



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

DOTTORATO DI RICERCA IN ARCHITETTURA

CICLO XXIX

COORDINATORE Prof.ssa Maria Teresa Bartoli

Effetti dei cambiamenti climatici sulle prestazioni energetiche degli edifici residenziali in clima Mediterraneo. *Il caso del patrimonio residenziale pubblico INA-Casa e Gescal della Toscana*

Settori Scientifico Disciplinari:

ING-IND/11 Fisica Tecnica Ambientale

ICAR/12 Tecnologia dell'Architettura

Dottorando

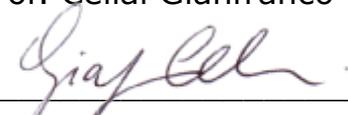
Dott. Pierangioli Leone



(firma)

Tutore

Prof. Cellai Gianfranco



(firma)

Coordinatore

Prof.ssa Maria Teresa Bartoli

(firma)

Anni 2014/2016

RINGRAZIAMENTI

Desidero ringraziare tutti coloro che mi hanno aiutato nella realizzazione della tesi: a loro va la mia gratitudine, a me spetta la responsabilità dei contenuti e degli eventuali errori.

Innanzitutto, il professor Gianfranco Cellai per la grande esperienza messa a disposizione, per l'entusiasmo e l'autorevolezza con cui mi ha guidato e soprattutto per l'umiltà e la generosità con cui mi ha concretamente aiutato nei momenti più difficili.

I revisori, Proff. Vincenzo Corrado e Luigi Marletta, per aver accettato l'onere di una accurata rilettura del testo e per i preziosi consigli per renderlo maggiormente comprensibile nei risultati.

Gli amici del Laboratorio di Fisica Tecnica per la Qualità Edilizia dell'Università di Firenze, i Proff. Cristina Carletti, Fabio Sciarpi e Simone Secchi, per avermi dato per diversi anni l'opportunità di partecipare a ricerche e collaborazioni utili per l'impostazione e lo sviluppo del presente lavoro.

Il Prof. Marco Bindi, i Dott. Roberto Ferrise e Giacomo Trombi del Dipartimento di Scienze delle Produzioni Agroalimentari e dell'Ambiente dell'Università di Firenze, per il prezioso e paziente aiuto fornito nella definizione dei dati metereologici e nell'inquadramento della problematica dei cambiamenti climatici.

Il Prof. Antonio Lauria, referente del Curriculum di Tecnologie dell'Architettura durante il XXIX ciclo, per il costante lavoro di supporto e coordinamento.

I Dott. Andrea Lapadula e Caterina Innocenti, per l'aiuto nel reperimento del materiale storico dei piani INA-CASA e Gescal di Pistoia.

A Francesca e alla piccola Alice

ABSTRACT

La tesi affronta il tema degli effetti dei cambiamenti climatici di medio (2036-65) e lungo periodo (2066-95) sulle prestazioni energetiche degli edifici collocati nelle zone climatiche C e D (clima mediterraneo) e ne analizza l'impatto sulle strategie di riqualificazione energetica dei patrimoni edilizi residenziali costruiti precedentemente all'entrata in vigore della Legge 373/76.

Dai primi risultati della ricerca, che concordano con le conclusioni dei principali contributi internazionali sul tema, emerge come, a fronte del prevedibile incremento delle temperature esterne, gli edifici esistenti vedranno un rilevante aumento dei propri consumi per raffrescamento. In particolare, sul lungo periodo, l'incremento di energia richiesto per coprire il fabbisogno estivo, in funzione della tipologia edilizia e del livello di isolamento degli edifici (epoca di costruzione), potrebbe non essere compensato dalla diminuzione del corrispondente fabbisogno invernale, portando ad un incremento dei consumi di energia primaria globale con un conseguente aumento delle emissioni di gas climalteranti a carico del settore civile. Le analisi preliminari svolte per indagare l'efficacia delle misure di efficientamento energetico nell'affrontare i cambiamenti climatici, evidenziano inoltre come negli edifici esistenti non coibentati la priorità di intervento sarà ancora costituita dall'isolamento termico dell'involucro, mentre negli edifici attuali già isolati sarà primariamente richiesto il controllo degli apporti solari.

Da queste considerazioni, già avallate da altre ricerche, emerge la necessità di valutare mediante strumenti e metodologie adeguate, gli interventi di efficientamento energetico dei patrimoni edilizi esistenti prendendo in considerazione anche gli effetti dei cambiamenti climatici sulle diverse tipologie edilizie, epoche di costruzione e contesti climatici e microclimatici.

La ricerca si propone pertanto di analizzare, mediante la simulazione energetica in regime dinamico, una casistica significativa di modelli edilizi multifamiliari in linea rappresentativi del patrimonio residenziale pubblico (INA-CASA e GESCAL) della Toscana, a cui si ipotizza di applicare le misure di efficienza energetica incentivate dallo Stato e maggiormente diffuse sul territorio nazionale, la cui fattibilità tecnico-economica è ampiamente documentata (ENEA). L'importanza del patrimonio edilizio preso in considerazione è dovuta alla sua entità numerica (il 52% delle abitazioni italiane è stato costruito nel periodo 1946-1980 e il 63% di queste è collocato in edifici plurifamiliari) e alla sua scarsa qualità energetica, in quanto costruito antecedentemente

alla prima norma nazionale sul contenimento dei consumi energetici in edilizia. La rappresentatività del campione scelto è determinata dall'influenza che gli edifici realizzati nell'ambito dei suddetti piani di ricostruzione hanno avuto nel definire l'identità tipologica e distributiva dell'edilizia residenziale italiana del dopoguerra.

L'obiettivo della ricerca è, quindi, costituito dalla valutazione delle suddette misure di efficientamento, al fine di individuare quelle in grado di garantire prestazioni energetiche ottimali in funzione dei costi sul medio e sul lungo periodo. Alla luce della prospettiva di lungo termine adottata, la valutazione ha considerato diversi possibili scenari di evoluzione futura dei parametri climatici (intensità del cambiamento climatico) e dei fattori tecnico-economici (vita utile, tasso di sconto, prezzo dei vettori energetici) al fine di individuare le soluzioni più robuste, ovvero quelle che mantengono una validità apprezzabile nel tempo a fronte dei fattori di incertezza ipotizzati, e che quindi meglio si adattano ai possibili valori assunti dagli stessi. La metodologia adottata è analoga a quella sviluppata e condivisa a livello europeo (Direttiva 2010/31/UE, Regolamento UE 244/2012, 2012) per la determinazione dei livelli ottimali di prestazione energetica degli edifici. Tale metodologia è stata implementata in Italia, mediante una ricerca congiunta CTI, ENEA e RSE, finalizzata alla definizione dei requisiti minimi di prestazione energetica per gli edifici nuovi e soggetti a riqualificazione energetica contenuti nel DM 26/6/2015. In rapporto al suddetto lavoro, la presente tesi ha proposto le seguenti implementazioni, al fine di soddisfare gli obiettivi preposti:

- Estensione dell'analisi a località rappresentative delle zone climatiche C e D, che insieme includono quasi la metà degli edifici residenziali italiani, superando la zona E;
- Condizioni al contorno climatiche condizionate dagli effetti del riscaldamento globale;
- Allargamento dell'analisi tipologica del patrimonio edilizio esistente sviluppata nei progetti europei Tabula-Episcopa, al fine di incrementarne la rappresentatività degli edifici campione;
- Simulazione della prestazione energetica con codici di calcolo in regime dinamico al fine di valutare più accuratamente gli effetti dell'inerzia termica e dell'irraggiamento solare di particolare importanza in ambito mediterraneo.

Dall'analisi combinata dei costi e delle prestazioni energetiche, condotta secondo la suddetta impostazione metodologica, emergono indicazioni che, a prescindere dai valori assoluti, sono utili per evidenziare le tendenze dell'efficacia delle misure di adattamento al cambiamento climatico in clima mediterraneo.

Si evidenzia innanzitutto come l'individuazione degli interventi di riqualificazione caratterizzati da un profilo costi/prestazioni ottimale o quantomeno accettabile sia fortemente influenzata dalle caratteristiche tipologiche e tecnologiche dell'edificio, dalle incertezze relative ai comportamenti degli utenti e, infine, dagli scenari economici e climatici ipotizzati. Le differenze, in termini di prestazione energetica e ritorno economico dell'investimento possono essere molto significative e comunque tali da rendere necessaria un'accurata valutazione tesa ad evitare soluzioni di efficientamento non ottimali e soprattutto poco robuste. In generale le elaborazioni dei risultati indicano che le strategie di intervento più valide non si ottengono con l'applicazione di una sola misura di efficientamento (ad esempio la sola sostituzione degli infissi) ma prevedono sempre un'applicazione congiunta e coordinata di più misure di efficienza energetica diverse, articolate su livelli prestazionali adeguati al particolare contesto climatico ed edilizio nel quale si interviene. Se le schermature solari, negli edifici orientati ad Est ed Ovest, e i sistemi di climatizzazione con pompa di calore aria-aria invertibili, impiegati sia in estate che in inverno, mostrano la propria robustezza in tutti gli scenari considerati, maggiormente complessa è la selezione del corretto livello di isolamento termico dell'involucro: per le superfici trasparenti i requisiti di trasmittanza individuati dalla vigente legislazione (DM 26/6/2015) risultano un limite costo-ottimale che nel futuro non è conveniente superare; per l'involucro opaco, invece, gli interventi che considerano spessori di isolamento maggiori di quelli previsti negli edifici a energia quasi zero risultano ottimali nella maggior parte delle situazioni.

I risultati della ricerca, elaborati per due modelli di edificio esemplificativi della metodologia, sono stati sistematizzati in un foglio di calcolo, al fine di renderli facilmente consultabili e liberamente implementabili completando l'analisi sulla matrice tipologica o inserendo altre tipologie edilizie. Le indicazioni derivanti dalla ricerca possono essere utilizzabili, al fine di individuare aggiornamenti e correttivi ai limiti previsti dal DM 26/6/2015, nuovi valori da raccomandare per aree climatiche particolarmente interessate dall'incremento delle temperature, ovvero validare i livelli

prestazionali dell'involucro e degli impianti nell'ambito della riqualificazione di edifici esistenti.

In conclusione tutti gli aspetti analizzati possono avere ricadute interessanti per la revisione di aspetti normativi, anche legati all'incentivazione fiscale degli interventi di efficientamento, e per indirizzare efficacemente le scelte riguardanti la progettazione e l'efficientamento energetico del patrimonio edilizio residenziale esistente. Ciò consente di adottare una politica energetica e una strategia progettuale basata su una visione di lungo periodo che prenda in considerazione anche l'adattamento ai cambiamenti climatici tra altre possibili variabili, considerato che, trascurare del tutto tali aspetti, può portare ad una errata valutazione dei risultati attesi e perfino all'incentivazione e adozione di soluzioni potenzialmente controproducenti.

SOMMARIO

Introduzione	15
Campo d'indagine e quadro scientifico - normativo.....	15
Contributi attesi dalla ricerca	18
Obiettivi, strumenti e metodi della ricerca	20
Delimitazione dell'ambito della ricerca	26
Risultati attesi, destinatari e sviluppi futuri della ricerca	28
1 Riferimenti scientifici e normativi.....	32
1.1 Gli effetti dei cambiamenti climatici sulla prestazione energetica degli edifici residenziali	32
1.2 Genesi del DM 26/6/2015: dal progetto TABULA allo standard nZEB	35
1.2.1 Il Progetto TABULA-EPISCOPE	36
1.2.2 Applicazione nazionale della metodologia europea per la definizione dei requisiti minimi di prestazione energetica e DM 26/6/2015	41
2 Condizioni climatiche di riferimento.....	50
2.1 Il cambiamento climatico in area mediterranea	50
2.2 Selezione delle località climatiche di riferimento	52
2.3 Profili climatici attuali delle località di riferimento	57
2.3.1 Considerazioni sull'effetto isola di calore urbana	62
2.4 Generazione dei file climatici futuri	64
3 Strumenti e metodi della ricerca.....	71
3.1 Analisi energetica.....	71
3.1.1 Strumenti.....	72
3.1.2 Effetti della simulazione dinamica rispetto a quella semi-stazionaria delle norme UNI TS 11300.	75
3.1.3 Indicatori e condizioni al contorno	78
3.2 Validazione del software su caso di studio reale e simulazioni energetiche preliminari su edifici CTI.....	81

3.2.1	Edificio reale	82
3.2.2	Edifici standard CTI	86
3.3	Analisi economica: calcolo del costo globale degli interventi	90
3.3.1	Prezzi dei vettori energetici	96
4	La definizione degli edifici-tipo.....	102
4.1	Consistenza e caratteristiche tipologiche e tecnologiche del patrimonio edilizio residenziale nazionale e regionale	103
4.2	Analisi dei consumi energetici e relazioni con l'andamento climatico	114
4.3	Analisi storico - tipologica del patrimonio edilizio di riferimento	118
4.3.1	Il piano INA-CASA	118
4.3.2	Individuazione del campione di edifici	133
4.4	Analisi statistica del campione di edifici individuato	143
4.4.1	Riferimenti metodologici per classificazione degli edifici.....	143
4.4.2	Schedatura degli edifici campione	147
4.4.3	Consistenza e caratteristiche del patrimonio edilizio di studio	153
4.4.4	Matrice Tipologica	158
5	Interventi di riqualificazione energetica	174
5.1	Selezione delle misure di efficienza energetica.....	174
5.2	Caratteristiche degli interventi.....	182
6	Risultati oggetto di parametrizzazione.....	188
6.1	Analisi della Prestazione energetica	191
6.1.1	Effetto dei cambiamenti climatici sugli edifici non riqualificati.....	191
6.1.2	Effetto dei cambiamenti climatici sull'efficacia delle strategie di riqualificazione.....	194
6.1.2.1	Efficacia dell'isolamento termico dell'involucro opaco.....	194
6.1.2.1	Efficacia della sostituzione e della schermatura solare degli infissi	195
6.1.2.2	Efficacia della sostituzione del generatore di calore.....	197
6.1.2.3	Combinazione di differenti soluzioni di riqualificazione	199

6.2	Individuazione delle soluzioni economicamente ottimali: effetti del parametro Costo globale/Prestazione Energetica	206
6.2.1	Costo globale degli interventi al variare degli scenari.....	207
6.2.2	Individuazione degli interventi di riqualificazione più <i>robusti</i>	215
6.2.3	Valutazioni preliminari dei possibili effetti dell'utenza	223
6.3	Data-Base dei risultati e gestione mediante foglio elettronico.....	233
7	Conclusioni e riepilogo del contributo della ricerca nel contesto nazionale e internazionale.....	236
	Bibliografia	241

ALLEGATI

1	Schede degli edifici costituenti il patrimonio edilizio campione
2	Planimetrie degli Edifici-Tipo
3	Risultati completi dei calcoli energetici
3.1.1	edificio-tipo 1.3, orientamento Sud/Nord, zona climatica C
3.1.2	edificio-tipo 1.3, orientamento Ovest/Est, zona climatica C
3.1.3	edificio-tipo 2.1, orientamento Sud/Nord, zona climatica C
3.1.4	edificio-tipo 2.1, orientamento Ovest/Est, zona climatica C
3.1.5	edificio-tipo 1.3, orientamento Sud/Nord, zona climatica D
3.1.6	edificio-tipo 1.3, orientamento Ovest/Est, zona climatica D
3.1.7	edificio-tipo 2.1, orientamento Sud/Nord, zona climatica D
3.1.8	edificio-tipo 2.1, orientamento Ovest/Est, zona climatica D
4	Risultati completi dei calcoli economici
4.1	Interventi con minor costo globale al variare dello scenario climatico ed economico di riferimento.
4.2	Grafici "Costo Globale/Prestazione Energetica" al variare degli scenari considerati
4.2.1	edificio-tipo 1.3, orientamento Sud/Nord, zona climatica C

- 4.2.2 edificio-tipo 1.3, orientamento Ovest/Est, zona climatica C
- 4.2.3 edificio-tipo 2.1, orientamento Sud/Nord, zona climatica C
- 4.2.4 edificio-tipo 2.1, orientamento Ovest/Est, zona climatica C
- 4.2.5 edificio-tipo 1.3, orientamento Sud/Nord, zona climatica D
- 4.2.6 edificio-tipo 1.3, orientamento Ovest/ Est, zona climatica D
- 4.2.7 edificio-tipo 2.1, orientamento Sud/Nord, zona climatica D
- 4.2.8 edificio-tipo 2.1, orientamento Ovest/Est, zona climatica D

Introduzione

Campo d'indagine e quadro scientifico - normativo

Il riscaldamento globale, che per l'area Mediterranea è previsto sortire effetti particolarmente significativi sia in termini di aumento medio delle temperature estive che di incremento della frequenza e dell'intensità delle ondate di calore, porta ad una revisione critica delle soluzioni di efficientamento energetico fino ad oggi più frequentemente utilizzate, spostando in particolare l'attenzione sul comportamento degli edifici in regime estivo (Kovats et al., 2014). Le ricerche sul global warming, infatti, ipotizzano che nei paesi del sud Europa per garantire livelli di benessere termogrometrico irrinunciabili sul piano economico e sociale, occorrerà un maggiore fabbisogno totale annuo di energia. Tale aumento, peraltro già in atto, è dovuto alla maggior richiesta di raffrescamento estivo, non sufficientemente compensata dalla riduzione dei consumi energetici invernali. Ciò premesso, il **campo d'indagine** della tesi riguarda le azioni da mettere in campo per contenere i consumi energetici del patrimonio edilizio esistente con l'obiettivo primario di ridurre l'immissione in atmosfera di gas climalteranti a fronte dei cambiamenti climatici attesi. Questo obiettivo è congruente con gli indirizzi normativi europei (*Direttiva 2010/31/UE*, 2010, *Regolamento UE 244/2012*, 2012) al fine di individuare i limiti prestazionali energetici di riferimento tenuto conto dei costi degli interventi di riqualificazione energetica proposti.

A tal fine si è proceduto alla valutazione delle prestazioni delle più comuni e diffuse misure di efficienza energetica applicabili primariamente alla riqualificazione del patrimonio edilizio residenziale esistente, ma anche alla costruzione di nuovi edifici residenziali. In particolare viene analizzata la loro capacità di soddisfare gli obiettivi di mitigazione e adattamento ai cambiamenti climatici previsti. La suddetta valutazione, svolta secondo i comuni parametri di analisi finanziaria degli investimenti (costo dell'intervento, tempo di ritorno, tasso di interesse, costo del combustibile, ecc.), è finalizzata ad individuare il rapporto ottimale fra costo globale sul ciclo vita dell'intervento e prestazioni energetiche ottenute.

Il **quadro di riferimento scientifico e normativo** è quindi costituito dalla doppia esigenza strategica, riconosciuta a livello globale, di adattare le infrastrutture umane agli

effetti dei cambiamenti climatici previsti e di mitigare, al contempo, l'impatto di detti cambiamenti, riducendo l'emissione di gas serra di cui gli edifici del settore civile sono una delle maggiori fonti.

In particolare si presume che gli edifici che si troveranno ad operare in condizioni climatiche diverse da quelle per cui sono stati progettati, potrebbero essere afflitti da problemi di surriscaldamento e potrebbero non essere in grado di garantire le condizioni di comfort di progetto, con conseguenti possibili rischi per la salubrità delle abitazioni e per la produttività dei luoghi di lavoro (Matthies et al., 2008). Questa situazione prevedibilmente porta ad una variazione dell'entità e della composizione dei consumi energetici degli edifici: mentre nei climi freddi e temperati si assisterà, a causa dell'aumento generale delle temperature, ad una riduzione dei consumi energetici totali per una minore richiesta di riscaldamento, nelle altre aree climatiche del globo si assisterà ad un sostenuto aumento dei consumi energetici per la climatizzazione estiva (Kovats et al., 2014) (Revi et al., 2014).

I più recenti contributi scientifici dell'effetto del cambiamento climatico sulle prestazioni energetiche degli edifici e sul benessere termico (de Wilde and Coley, 2012), che peraltro non affrontano adeguatamente il contesto climatico italiano, concordano sull'importanza di valutare sul lungo periodo l'impatto di tali effetti sulle strategie di progettazione e di efficientamento, in particolare, l'incremento dell'isolamento termico (v. paragrafo 1.1). Questo tipo d'intervento, favorito dalle normative in modo sostanzialmente acritico ed indifferenziato, in climi temperati potrebbe rivelarsi persino controproducente, specie in assenza di efficaci schermature solari, con rischio di surriscaldamento e aumento del fabbisogno annuo di energia.

A livello istituzionale, l'Unione Europea si è fatta promotrice di programmi, progetti e direttive, riguardanti l'incremento dell'efficienza energetica degli edifici al fine di rispettare le prescrizioni della strategia "Europa 2020" (Commissione Europea, 2010) che prevedono una riduzione delle emissioni di gas serra del 20% rispetto al 1990 e gli obiettivi programmatici a lungo termine verso un'economia a bassa intensità di carbonio (-80%) entro il 2050. In particolare la Direttiva Europea 2010/31/UE, in considerazione delle elevatissime potenzialità di risparmio energetico e di contenimento delle emissioni di gas serra perseguibili agendo sul patrimonio edilizio esistente piuttosto che sulle nuove costruzioni (quasi il 40% del consumo energetico finale e il 36% delle emissioni globali di gas serra deriva dagli edifici esistenti), definisce i principi relativi al

miglioramento della prestazione energetica degli edifici, prevedendo che entro il 2021 (2019 per gli edifici pubblici) tutti gli edifici nuovi o riqualificati siano *edifici ad energia quasi zero (nZEB – nearly Zero Energy Building)* cioè edifici ad “*altissima prestazione energetica, caratterizzati da un fabbisogno energetico molto contenuto o quasi nullo che dovrebbe essere coperto in misura molto significativa da energia da fonti rinnovabili*”. In sintesi, con il concetto *nZEB*, l’attenzione si è spostata sul comportamento dell’involucro degli edifici chiamato a ridurre sensibilmente i carichi termici, soprattutto estivi, permettendo così di soddisfare le esigenze di comfort con impianti piccoli ed efficienti, possibilmente alimentati da fonti di energia rinnovabili, arrivando così all’autonomia energetica, alla riduzione significativa dell’emissione di gas climalteranti e all’ottimizzazione dei costi di gestione. In Figura 0-1 è sintetizzata la strategia a tridente messa in atto.

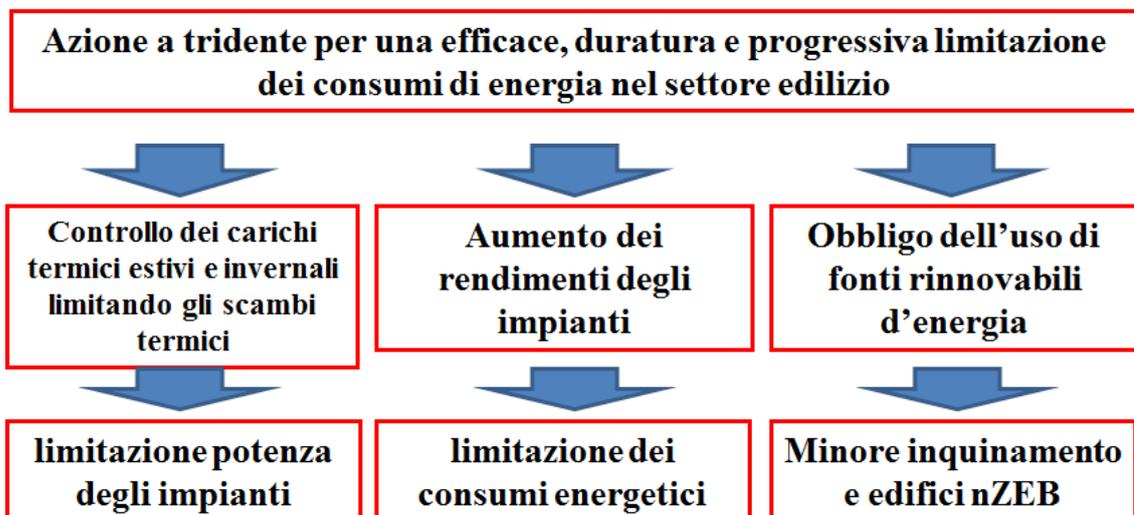


Figura 0-1 – Schema di sintesi della strategia per il contenimento dei consumi energetici nel settore edile promossa dalla Direttiva Europea 2010/31/UE

Al fine di individuare strategie adeguate, sono stati attivati i **progetti europei TABULA ed EPISCOPE** che costituiscono un riferimento conoscitivo e metodologico fondamentale per la presente ricerca (vedi paragrafo 1.2.1). Partendo dalle stesse premesse di carattere normativo (*Direttiva 2010/31/UE*, 2010, *Regolamento UE 244/2012*, 2012) il Progetto IEA-EBC (*International Energy Agency - Energy in Buildings and Communities*) Annex 56 “*Cost Effective Energy & CO2 Emissions Optimization in Building Renovation*” analizza un campione di interventi di riqualificazione realizzati, assunti come modelli di buona pratica, al fine di stabilire una metodologia di selezione delle strategie di efficientamento che permetta di raggiungere

obiettivi di riduzione dei consumi energetici e delle emissioni climalteranti in un ottica di ottimizzazione dei costi. Il progetto e gli studi che lo accompagnano veicolano il concetto fondamentale che gli obiettivi di prestazione energetica, in particolare nel caso di azioni sui patrimoni edilizi residenziali esistenti caratterizzati da vincoli tecnici, funzionali ed economici specifici, devono essere sempre contestualizzati e commisurati alla fattibilità tecnica e soprattutto all'ottimizzazione economica dell'intervento stesso (Almeida et al., 2015; Almeida and Ferreira, 2015; Ferrari and Zagarella, 2015; Ferreira and Almeida, 2015; IEA EBC Annex 56, 2014, 2014). Da quanto precede deriva il principio imprescindibile, che la prestazione energetica degli edifici, ovvero di eventuali interventi, deve essere valutata e ottimizzata anche e soprattutto in funzione dei costi globali sul ciclo vita degli interventi stessi.

Per l'Italia, considerato che circa il 50% del patrimonio edilizio nazionale è stato realizzato fra il dopoguerra e il 1976 (ISTAT, 2016), anno di emanazione della prima legge sul risparmio energetico in edilizia (Legge 373/76) (Ministero dello Sviluppo Economico, 2015a, 2015b), è quindi prioritario, individuare misure di riqualificazione degli edifici esistenti che, al variare delle caratteristiche tipologiche e tecnologiche, si adattino ai cambiamenti climatici attesi garantendo agli utenti condizioni di comfort e salubrità accettabili senza incrementare o se possibile riducendo il consumo energetico. In pratica si tratta di attuare strategie volte alla riqualificazione energetica dei patrimoni edilizi che:

- tengano conto degli scenari climatici e socio-economici che abbiano maggiori probabilità di avverarsi;
- tendano all'ottimizzazione del rapporto costo/prestazioni sul ciclo vita;
- possano essere di riferimento per la progettazione di nuovi edifici.

Contributi attesi dalla ricerca

In Italia, nel settore residenziale, la domanda di climatizzazione estiva (mediamente di circa 20 kWh/m²) si stima che raddoppi nel 2050 (Unità Centrale Studi e Strategie ENEA, 2014). Occorre quindi valutare strategie di riqualificazione diverse da quelle finora attuate, di derivazione nord europea, sbilanciate a favore del controllo dei consumi energetici invernali e quindi non idonee ad affrontare i cambiamenti climatici in area mediterranea.

In particolare il D.M. 26 Giugno 2015 (decreto attuativo della Legge 90/2013, che recepisce a livello nazionale la direttiva 2010/31/UE) ha introdotto i requisiti minimi di prestazione energetica che dovranno caratterizzare gli edifici di nuova costruzione o soggetti a ristrutturazioni edilizie o riqualificazioni energetiche. Tali requisiti prestazionali sono stati determinati a livello nazionale (Ministero dello Sviluppo Economico, 2013), coerentemente con quanto previsto dal Regolamento UE 244/2012 e dalle relative Linee Guida (Commissione Europea, 2012; *Regolamento UE 244/2012*, 2012), in un’ottica di raggiungimento dei livelli di prestazione energetica che conducono al costo più basso **durante il ciclo di vita economico stimato dell’edificio**.

E’ quindi auspicabile che la suddetta metodologia possa essere implementata, o quantomeno validata ed eventualmente corretta, considerando anche l’effetto che i previsti cambiamenti climatici possono avere sull’evoluzione della prestazione energetica degli edifici durante la loro vita utile. A tal proposito è necessario considerare che in Italia:

- i requisiti minimi di prestazione energetica per gli edifici, introdotti dal Decreto Ministeriale 26 Giugno 2015, essendo validi, nella loro forma definitiva, a partire dal 2021, riguarderanno edifici nuovi o ristrutturati la cui vita utile si estenderà ben oltre il 2050, fino al limite del 2100;
- sono state considerate come riferimento le sole zone climatiche “B” ed “E”¹ ;
- sono stati impiegati, come da regolamento europeo, i dati climatici nazionali ufficiali derivanti dalla norma UNI 10349 (UNI - Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 1994) che sono stati successivamente oggetto di recente revisione e aggiornamento, in quanto riferiti a rilevazioni ormai datate (Ministero dello Sviluppo Economico, 2013);
- gli edifici tipo utilizzati per definire i requisiti minimi di prestazione energetica sono stati elaborati nell’ambito del progetto TABULA, sulla base dei dati relativi al patrimonio edilizio della regione Piemonte, e pertanto è utile estendere la metodologia quanto più possibile ad edifici-tipo rappresentativi di altre realtà territoriali e, progressivamente, finanche all’intero patrimonio

¹ Per la classificazione climatica dei comuni italiani ai fini della valutazione energetica degli edifici e la definizione dei gradi giorno si faccia riferimento al Decreto del presidente della Repubblica n. 412 del 26 agosto 1993.

edilizio nazionale In tale contesto si inserisce infatti la prosecuzione del lavoro di TABULA con il progetto EPISCOPE (Corrado et al., 2014; Corrado and Ballarini, 2015)

Affrontare queste **problematiche** appare tanto più importante alla luce del fatto che, l'aumento della temperatura media della regione sud-europea, rispetto al periodo 1986-2005 potrebbe superare i 4 °C (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014a).

Da queste considerazioni scaturiscono le seguenti **domande a cui la ricerca si propone di dare un contributo, pur parziale, nelle risposte,:**

- I consumi per climatizzazione del patrimonio edilizio residenziale costruito in Italia nel dopoguerra aumenterà o diminuirà a fronte dei cambiamenti climatici previsti sul medio e lungo termine? Come cambierà la composizione (riscaldamento e raffrescamento) dei consumi?
- I requisiti minimi di efficienza energetica promossi dalla normativa nazionale con l'obiettivo di garantire prestazioni energetiche ottimali in funzione dei costi, sono efficaci ai fini dell'adattamento ai previsti cambiamenti climatici?
- Quali, fra le strategie di riqualificazione energetica più diffusamente applicate, si adatteranno meglio ai contesti climatici futuri ovvero risulteranno più *robuste*, cioè, meno sensibili al cambiamento degli scenari climatici, economici e del comportamento dell'utenza?

Obiettivi, strumenti e metodi della ricerca

Al fine di contribuire alle risposte delle suddette domande, l'efficacia delle strategie di riqualificazione energetica è valutata in rapporto al concetto di "robustezza", cioè alla capacità degli edifici riqualificati di mantenere, nel tempo, la propria prestazione energetica ed economica (costo globale sul ciclo vita) all'interno di un intervallo ottimale al variare degli scenari climatici ed economici considerati (Lee and Hensen, 2015). Le strategie d'intervento più "robuste", possono non essere le migliori in assoluto dal punto di vista della prestazione energetica, ma sono le più affidabili, cioè quelle che garantiscono livelli di costo globale degli interventi il più possibile costanti a fronte delle variabili di input la cui evoluzione futura è incerta e di difficile previsione (ad es. gli scenari economici). In particolare, coerentemente con gli indirizzi metodologici della Commissione Europea (*Regolamento UE 244/2012*, 2012), è necessario tenere conto dei fattori di incertezza, fra cui almeno l'evoluzione del prezzo

dell'energia e il tasso di sconto, integrando nel calcolo almeno due diversi scenari per ciascuna variabile in modo da ottenere un'analisi della sensibilità dei risultati della ricerca alle suddette variazioni.

Alla luce dell'orizzonte temporale estremamente esteso preso in considerazione (fino al 2100), questo approccio permette di valutare, l'influenza, sui risultati della ricerca, dei principali fattori di incertezza considerati in questo tipo di studi (de Wilde and Tian, 2011, 2012); in merito, l'Intergovernmental Panel on Climate Change (2014b) scrive: "The implications of anthropogenic climate change for environment and society depend [...] also on the [...] responses by humans through changes in technology, economies, lifestyle and policy. In climate change research, scenarios describe plausible trajectories of different aspects of the future. [...] The goal of working with scenarios is not to predict the future but to better understand uncertainties and alternative futures, in order to consider how robust different decisions or options may be under a wide range of possible futures."

Per individuare le strategie di riqualificazione energetica più "robuste" la ricerca è stata articolata nei seguenti **obiettivi specifici**:

- **Obiettivo primario (variazione dei parametri principali)**: Ipotizzando profili di utenza standardizzati (*asset rating*²), ci si propone di individuare le strategie di riqualificazione energetica che presentano un rapporto costo/prestazione ottimale al variare degli scenari determinati dalla combinazione dei seguenti parametri:
 - Entità del cambiamento climatico;
 - Vita utile dell'edificio;
 - Tasso di sconto;
 - Andamento dei prezzi dei combustibili;
 - Tipologia e orientamento dell'edificio;
 - Zona climatica.

² La normativa tecnica di riferimento per la valutazione energetica degli edifici (Ente Nazionale Italiano di Unificazione - UNI, 2014a) prevede di effettuare diversi tipi di valutazione: il tipo "standard" (*asset rating*) facendo riferimento ad utenza e clima standardizzati e il tipo "adattata all'utenza" (*tailored rating*) con dati di input relativi ad utenza e clima realistici.

I valori assunti dai suddetti parametri sono stati fissati tenendo conto degli scenari estremi per la necessità di “forzare” i risultati dell’analisi al fine di evidenziare eventuali criticità delle azioni progettuali proposte. Ad esempio per quanto riguarda l’entità del cambiamento climatico si considerano due scenari: l’assenza del riscaldamento globale e la sua manifestazione più estrema (scenario IPCC RCP 8,5). Seguendo lo stesso criterio si è scelto di utilizzare un file climatico di base (Firenze) che incorpori l’effetto Isola di Calore Urbana, in grado di amplificare ulteriormente gli effetti del cambiamento climatico. Coerentemente con tale approccio si è scelto di definire i modelli di edificio senza considerare la presenza di ostruzioni esterne che, oltre ad essere estremamente aleatorie, avrebbero potuto influenzare i risultati determinando una riduzione del carico termico per raffrescamento. Viceversa si è tenuto conto dell’effetto dell’orientamento.

- **Obiettivo secondario (effetto dell’utenza)**: Ci si propone di verificare se le soluzioni più “robuste” individuate al punto precedente, mantengono la prestazione attesa adottando condizioni d’uso non standardizzate (*tailored rating*³). In particolare si considerano profili di utenza non costanti che influenzano la gestione della ventilazione naturale, dell’illuminazione artificiale, dell’uso delle apparecchiature domestiche e della gestione manuale delle schermature;

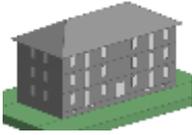
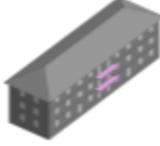
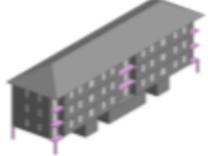
Questo approccio permette, pur con le limitazioni del caso, di affrontare il tema della *robustezza* delle misure di adattamento ai cambiamenti climatici in clima Mediterraneo evidenziandone le possibili criticità. In particolare si mettono le premesse per l’analisi di ulteriori scenari oggetto di successive ricerche di approfondimento. Per raggiungere gli obiettivi, si utilizzano i seguenti **strumenti e metodi** procedendo per fasi:

1. Elaborazione di profili climatici utilizzabili nella simulazione energetica degli edifici, che incorporino i cambiamenti climatici previsti dai modelli climatologici;

³ La normativa tecnica di riferimento per la valutazione energetica degli edifici (Ente Nazionale Italiano di Unificazione - UNI, 2014a) prevede di effettuare diversi tipi di valutazione: il tipo “standard” (*asset rating*) facendo riferimento ad utenza e clima standardizzati e il tipo “adattata all’utenza” (*tailored rating*) con dati di input relativi ad utenza e clima realistici.

2. Valutazione preliminare degli effetti del riscaldamento climatico sul bilancio energetico di edifici standard elaborati dal Comitato Termotecnico Italiano (CTI), in funzione del livello di isolamento termico e dell'applicazione di diverse strategie di adattamento applicabili;
3. Individuazione di un campione di edifici-tipo (Matrice delle Tipologie Edilizie rappresentata in Tabella 0-1), che rappresentino a livello statistico accettabile le caratteristiche del patrimonio edilizio INACASA e GESCAL oggetto di analisi; il riferimento metodologico è costituito dal progetto europeo TABULA (Corrado et al., 2014) che prevede una valutazione energetica semplificata degli edifici-tipo con metodo semi stazionario e clima standardizzato;

Tabella 0-1 – Matrice tipologica del parco edilizio analizzato

		CLASSE DI DIMENSIONE		
		Ed. Piccolo Volume $\leq 2700 \text{ m}^3$ Unità imm. ≤ 8	Ed. Medio $2700 < \text{Volume} < 4800 \text{ m}^3$ $8 < \text{Unità imm.} \leq 15$	Ed. Grande Volume $\geq 4800 \text{ m}^3$ Unità imm. > 15
EPOCA DI PROGETTAZIONE	1946 - 1960	Tipo 1.1	Tipo 1.2	Tipo 1.3
				
		Unità imm.=6 Superficie =496.2 m^2 Volume=1987.0 m^3	Unità imm.=12 Superficie =872.4 m^2 Volume=3428.2 m^3	Unità imm.=24 Superficie =1618.8 m^2 Volume=6293.7 m^3
	1961 - 1977	Tipo 2.1	Tipo 2.2	Tipo 2.3
				
		Unità imm.=6 Superficie =485.7 m^2 Volume=1893.1 m^3	Unità imm.=12 Superficie =954.3 m^2 Volume=3697.5 m^3	Unità imm.=24 Superficie =1633.2 m^2 Volume=6201.9 m^3

4. Individuazione e caratterizzazione degli interventi di riqualificazione energetica da analizzare: sono stati presi in considerazione gli interventi che godono di incentivazione fiscale e che hanno maggiore diffusione sul territorio nazionale come risulta dalla documentazione ENEA (Nocera, 2015);
5. Calcolo della prestazione energetica e del costo globale (UNI - Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 2008a) degli interventi di efficientamento applicati singolarmente o in forma coordinata (combinazioni di interventi) agli edifici tipo, al variare dei parametri/scenari considerati; il riferimento metodologico di

questa fase è costituito dall'applicazione nazionale della metodologia di calcolo europea (Regolamento delegato UE n.244/2012 e relative Linee guida di accompagnamento) per la determinazione dei livelli ottimali dei requisiti minimi di prestazione energetica in funzione dei costi di cui in Figura 0-2 è riportato un grafico esemplificativo (Ministero dello Sviluppo Economico, 2013);

6. Individuazione delle strategie di intervento ottimali in funzione dei costi e valutazione del grado di “robustezza” al variare degli scenari climatici ed economici proposti;

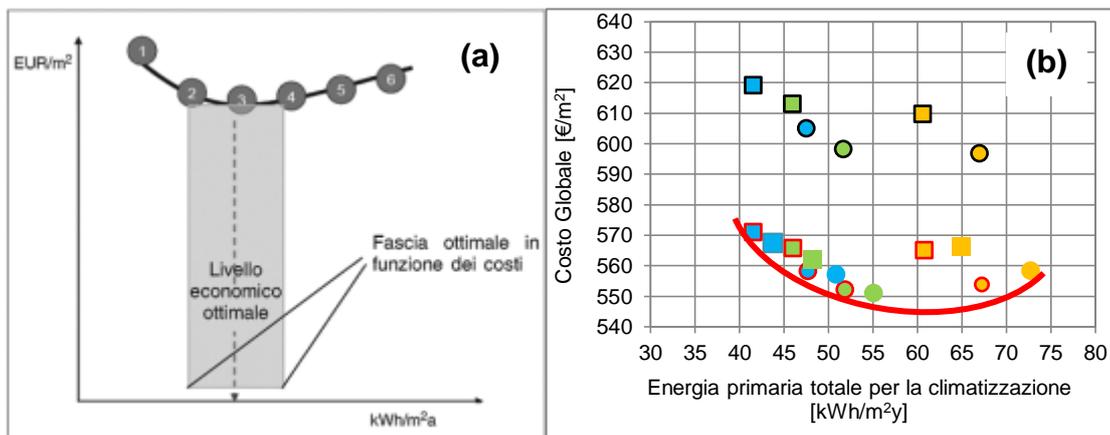


Figura 0-2 – Rappresentazioni grafiche del rapporto fra prestazioni energetiche e costo globale di soluzioni di efficienza energetica. A sinistra (a) rappresentazione esemplificativa tratta dal Regolamento delegato (UE) n. 244/2012. A destra (b) esempio di rappresentazione dei risultati della presente ricerca.

I contributi originali apportati dalla ricerca rispetto ai riferimenti conoscitivi di partenza⁴) riguardano:

- a. l'impiego di un set di edifici-tipo rappresentativo di una diversa realtà geografico-climatica;
- b. l'uso di metodi di calcolo dinamici su base oraria⁵ rispetto ai metodi semi-stazionari (confronta paragrafo 3.1.1) attualmente impiegati (Corrado and Paduos, 2010);
- c. l'implementazione di condizioni al contorno climatiche rappresentative di scenari futuri;

⁴ valutazione energetica semi-stazionaria degli edifici CTI, risultati e metodo dei Progetti TABULA-EPISCOPE e applicazione nazionale della metodologia europea per la determinazione costo-ottimale dei requisiti minimi di prestazione energetica

⁵ Software Energy Plus ver. 8.1 con interfaccia grafica Design Builder ver. 3.4

- d. la valutazione dell'effetto di un utenza *non standardizzata* sui risultati dello studio.

Al fine di esporre più chiaramente l'articolazione della ricerca e i contributi apportati in ogni fase, in Tabella 0-2 si riporta un diagramma schematico rappresentativo della metodologia adottata, dei riferimenti impiegati e dei contributi della ricerca.

Tabella 0-2 – Diagramma schematico del metodo della ricerca

Strumenti di partenza	Contributo della ricerca
<i>Fase 1: elaborazione profili climatici futuri</i>	
<ul style="list-style-type: none"> - Profili climatici orari ufficiali CTI; - Metodo di trasformazione dei file climatici da Belcher et al. (2005); - Output modello climatico regionale COSMO CLM per l'Italia. 	Profili climatici futuri per la simulazione energetica (periodi 2036-65 e 2066-95; scenari di riferimento RCP 4,5 e RCP 8,5)
<i>Fase 2: Simulazioni preliminari (verifica delle ipotesi e messa a punto metodologia)</i>	
Edifici tipo CTI impiegati per validazione dei software di valutazione energetica in regime semi-stazionario	Nuova valutazione energetica edifici CTI con: <ul style="list-style-type: none"> - simulazione dinamica - profili climatici futuri - strategie di adattamento ai CC
<i>Fase 3: Definizione degli edifici-tipo (Matrice Tipologica)</i>	
<ul style="list-style-type: none"> - Metodologia TABULA - Documentazione archivistica delle caratteristiche tipologiche e tecnologiche degli edifici INA-Casa e Gescal di Pistoia 	Definizione di 6 modelli fabbricato-impianto originali rappresentativi degli edifici multifamiliari in linea costruiti in Toscana fra il 1946 e il 1978
<i>Fase 4: Individuazione degli interventi di efficientamento energetico</i>	
<ul style="list-style-type: none"> - Statistiche ENEA sugli interventi con incentivazione fiscale (55%/65% IRPEF); - Livelli prestazionali minimi da DM 26.6.2015. 	Individuazione delle misure di efficientamento energetico oggetto di analisi e dei relativi livelli prestazionali
<i>Fase 5: Calcolo della prestazione energetica e del costo ottimale degli interventi di efficientamento energetico</i>	
<i>Fase 6: Individuazione delle soluzioni costo-ottimali più robuste</i>	
<ul style="list-style-type: none"> - Metodologia di calcolo europea per la determinazione dei livelli ottimali dei requisiti minimi di prestazione energetica in funzione dei costi; - Applicazione nazionale della metodologia europea (Ministero dello Sviluppo Economico, 2013) 	Implementazione dell'applicazione nazionale con: <ul style="list-style-type: none"> - metodo di calcolo dinamico; - set di edifici- tipo alternativo; - profili climatici futuri; - effetto dell'utenza.

Delimitazione dell'ambito della ricerca

Lo studio degli effetti dei cambiamenti climatici sulle prestazioni energetiche e ambientali degli edifici prevede l'analisi di un panorama di parametri e variabili, molto ampio ed eterogeneo (caratteri delle tipologie edilizie e degli impianti, condizioni climatiche, fattori economici, etc.). Poiché non è possibile considerare nel presente studio tutte le possibili varianti dei fattori coinvolti ci si concentra sui seguenti aspetti che riteniamo prioritari:

Tipologie edilizie: il campione di studio della ricerca è rappresentato dagli edifici residenziali plurifamiliari isolati o in linea costruiti in Toscana fra il secondo dopoguerra e il 1978, periodo che ha conosciuto la più cospicua e rapida espansione edilizia della storia italiana e che, in quanto precedente all'introduzione dei primi provvedimenti legislativi di risparmio energetico, è stato maggiormente interessato dal problema della scarsa qualità energetica degli edifici. La scelta di concentrare l'analisi sulla riqualificazione energetica dei patrimoni edilizi esistenti consente di applicare gli esiti della ricerca su vasta scala e di garantire un impatto potenziale rilevante in termini di riduzione delle emissioni climalteranti e di mitigazione dei cambiamenti climatici (IEA EBC Annex 56, 2014). Del resto si assiste ad una sempre minore incidenza delle nuove costruzioni sullo stock edilizio nazionale sia a seguito della crisi edilizia sia per la necessità di contenere il consumo di suolo che hanno portato alla vocazione dei regolamenti urbanistici "a volume zero" con conseguente incentivazione al recupero del patrimonio edilizio esistente. L'importanza e significatività del campione scelto è confermata dai dati ISTAT sugli edifici residenziali: il 52% delle abitazioni italiane è stato costruito nel periodo 1946-1980 e il 63% di queste è collocato in edifici plurifamiliari (con 3 o più unità immobiliari). L'Italia risulta infatti, a livello europeo, uno dei paesi che, assieme alla Spagna e diversamente dai paesi nordici, ha la più bassa incidenza di edifici residenziali monofamiliari (Birchall et al., 2014). E' poi necessario considerare come gli edifici plurifamiliari siano considerati più facilmente riqualificabili, in quanto caratterizzati da un rapporto di forma più contenuto e una maggiore uniformità morfologica che può favorire, ad esempio, l'applicabilità dell'isolamento termico esterno. L'azione su questo tipo di edifici permette inoltre di migliorare con un unico intervento la prestazione energetica e la qualità ambientale di numerose unità abitative rendendo la riqualificazione energetica più efficace ed economica rispetto alle abitazioni mono e bi-familiari (Birchall et al., 2014). Il

patrimonio di riferimento è stato analizzato facendo ricorso al caso di studio costituito dagli edifici residenziali pubblici costruiti a Pistoia nel periodo suddetto, nell'ambito dei programmi INA-Casa e Gescal di cui nella Figura 0-3 sono riportati alcuni esempi. Tali interventi hanno visto l'assoluta prevalenza delle tipologie edilizie della casa in linea e della casa multipiano isolata (palazzina) con la quasi totale esclusione di case a schiera, villette isolate e di edifici a torre (Acocella, 1980; Beneforti and Ottanelli, 2012; Costa, 1985; Fantozzi and Roda, 1992; Marta and Panzarasa, 1963; Secchi and Toti, 2000).



Figura 0-3 – Esempi di edifici di edilizia residenziale pubblica costruiti dallo IACP di Pistoia fra il 1945 e il 1978

Contesto climatico: al fine di perseguire gli obiettivi, la tesi si concentra, all'interno del più ampio contesto climatico e geografico Mediterraneo, sulla regione Toscana e, in

particolare, sui tipi di clima “mediterraneo temperato caldo” che caratterizza l’entroterra toscano e “Mediterraneo temperato sub-litoraneo” che caratterizza la fascia costiera (Pinna, 1978), ritenuti significativi per gli obiettivi della ricerca

Interventi di riqualificazione: la tipologia di interventi di riqualificazione presi in esame sono quelli incentivati nei programmi di agevolazione fiscale promossi dal Governo italiano a partire dal 2007, la cui applicazione è ormai ampiamente sperimentata e diffusa sul territorio nazionale e la cui fattibilità tecnica ed economica è documentata tramite statistiche ed esempi applicativi (Nocera, 2015). In particolare sono presi in considerazione tutti gli interventi attuabili a livello condominiale (interventi di coibentazione dell’involucro opaco) o a livello di singola utenza (sostituzione e schermatura degli infissi, sostituzione dei sistemi autonomi di generazione tradizionali con caldaie a condensazione e pompe di calore elettriche ad espansione diretta) In Figura 0-4 è riportata la diffusione nazionale dei suddetti interventi.



Figura 0-4 – Diffusione degli interventi di riqualificazione energetica incentivati in Italia (Nocera, 2015) (a) e interventi di riqualificazione energetica considerati nella presente ricerca (b)

Risultati attesi, destinatari e sviluppi futuri della ricerca

Il contributo conoscitivo principale della presente ricerca è dato dall’apporto all’analisi degli effetti dei cambiamenti climatici sulla prestazione energetica degli edifici in Italia Centrale e delle possibili risposte in termini di efficientamento e adeguamento del

parco edilizio esistente, data la sostanziale assenza di studi sistematici analoghi applicati a questo contesto climatico.

A tal fine la ricerca si propone di predisporre un data-base dei risultati, implementabile nel tempo mediante ulteriori ricerche ad approfondimenti, che possa aiutare progettisti e stakeholder ad individuare, nell'ambito di tipologie edilizie di riferimento, le soluzioni d'intervento che possano ritenersi più *robuste* (e quelle viceversa più critiche), i limiti prestazionali da conseguire (es. livello di prestazione, spessore ottimale d'isolamento, ecc.), a partire dalla conoscenza di semplici parametri tipologici quali il volume lordo riscaldato, il fattore di forma S/V, il rapporto tra superfici finestrate/superficie climatizzata (S_f/S_u).

Il data-base, che può essere utilizzato per la riqualificazione energetica degli edifici esistenti e per la progettazione di nuovi edifici, consente di scegliere, in un ventaglio di possibili soluzioni, quelle che presentano il miglior rapporto fra costo e prestazione energetica considerando le incertezze sull'evoluzione futura degli scenari climatici (riscaldamento globale) ed economici. I destinatari privilegiati del data-base, sono, quindi, le autorità legislative competenti in materia, i gestori di patrimoni residenziali pubblici e privati, le società e i consorzi di fornitura energia, i costruttori edili e i progettisti. Questi soggetti potranno basarsi sugli scenari ipotizzati per indirizzare efficacemente le scelte progettuali, adottando una strategia di lungo periodo che prenda in considerazione l'adattamento ai cambiamenti climatici e che eviti, pertanto, interventi potenzialmente controproducenti o persino errori difficilmente rimediabili.

A livello legislativo, il data-base può, inoltre, dare informazioni sull'adeguatezza dei limiti di isolamento attualmente vigenti e sulla direzione da intraprendere nel prossimo futuro qualora il tema dei cambiamenti climatici fosse preso in considerazione. A livello di incentivazione fiscale degli interventi di riqualificazione energetica, il data-base può indicare le soluzioni più efficaci nel tempo e più *robuste* e quindi meritevoli di maggiore attenzione/promozione. In particolare, si evidenzia che i risultati della ricerca possono contribuire:

- all'aggiornamento quinquennale dei requisiti minimi di prestazione energetica previsto dalla Direttiva Europea 2010/31/EU, in relazione all'introduzione del cambiamento climatico e dell'analisi dinamica nella procedura di calcolo;

- alla valutazione della congruità dei requisiti minimi di prestazione energetica per la riqualificazione e per la nuova progettazione degli edifici di cui Decreto Ministeriale 26 Giugno 2015, rispetto ai cambiamenti climatici previsti;
- all'aggiornamento dei criteri ambientali minimi per l'affidamento di servizi di progettazione e lavori per la nuova costruzione, ristrutturazione e manutenzione di edifici della pubblica amministrazione per quanto riguarda la prestazione energetica dell'edificio di cui al D.M. 24/12/2015.

La ricerca oggetto della presente tesi ha, inoltre, prodotto i seguenti risultati intermedi:

- Generazione di file climatici utilizzabili nei software di simulazione energetica degli edifici, che includono le tendenze climatiche future previste per i periodi 2035-2065 e 2066-2095, sulla base delle proiezioni del 5° Rapporto IPCC per gli scenari RPC 4.5 e RPC 8.5 (Cubasch et al., 2013);
- Definizione di una serie di modelli di edifici-tipo, statisticamente rappresentativi del patrimonio di edifici residenziali multipiano in linea costruiti in Toscana fra il 1945 e il 1978. Questa risorsa può contribuire all'estensione e al completamento del database delle tipologie edilizie nazionali, sviluppato nell'ambito del progetto TABULA (Corrado et al., 2014) che fa attualmente riferimento al patrimonio edilizio della sola zona climatica "E". Tali modelli definiti in tutte le proprietà dimensionali, tipologiche e tecnologiche utili ai fini delle valutazioni fisico tecniche, possono, inoltre, essere impiegati per analisi energetiche e ambientali i cui risultati debbano essere estesi ad intere porzioni del patrimonio edilizio.

Gli sviluppi futuri ipotizzabili per la presente ricerca potrebbero essere rappresentati dalle seguenti attività:

- Ampliamento della banca dati dei profili climatici futuri per la simulazione energetica degli edifici ad altre località italiane;
- Estensione della metodologia ad altre realtà territoriali caratterizzate da contesti climatici ed edilizi sensibilmente differenti. Questo sviluppo permetterebbe di individuare le zone maggiormente vulnerabili rispetto agli impatti dei cambiamenti climatici in rapporto alle prestazioni energetiche degli edifici;
- Estensione della metodologia ad altre tipologie edilizie; in particolare, agli edifici pubblici con elevati requisiti di benessere ambientale, quali edifici scolastici e ospedalieri, nonché al patrimonio edilizio storico e ad altre tipologie

residenziali che non sono state prese in esame nel presente lavoro (villette singole, case a schiera edifici a torre);

1 Riferimenti scientifici e normativi

1.1 Gli effetti dei cambiamenti climatici sulla prestazione energetica degli edifici residenziali

Nella Tabella 1-1 è riportata una sintetica rassegna delle ricerche più recenti sul tema dell'effetto del cambiamento climatico sulle prestazioni energetiche e sul benessere termico degli edifici, suddivisi in base alla destinazione d'uso.

Tabella 1-1 Principali risultati degli studi sull'effetto dei cambiamenti climatici sulle prestazioni energetiche e sul benessere termico degli edifici.

Riferimento	Clima	Principali risultati e conclusioni
<i>Studi che riguardano edifici esclusivamente residenziali</i>		
(Gupta and Gregg, 2012)	Oxford (Regno Unito)	Lo studio valuta gli effetti del riscaldamento climatico sul comfort termico delle tipiche costruzioni residenziali inglesi. Il rischio maggiore di surriscaldamento è, secondo tale ricerca, da attribuire all'irraggiamento solare e all'isolamento termico; di conseguenza la misura adattiva più efficace risulta essere l'uso di schermature, anche se sul lungo periodo non sufficiente ad evitare il rischio di surriscaldamento con la conseguente necessità di ricorrere al raffrescamento meccanico.
(Porritt et al., 2012)	Londra e regione Sud Est (Regno Unito)	Gli autori esaminano diverse possibili soluzioni per la ristrutturazione di edifici residenziali che siano in grado di affrontare gli effetti delle sempre più frequenti ondate di calore estive. Essi concludono che gli abitanti possono svolgere un ruolo decisivo mediante l'attivazione della ventilazione notturna e delle schermature solari. Altra importante considerazione è fatta in merito alla maggiore efficacia dell'isolamento delle pareti sul lato esterno rispetto a quello interno.
(Nik and Sasic Kalagasidis, 2013)	Stoccolma (Svezia)	Nik e Sasic Kalagasidis, fatta salva l'incertezza delle previsioni di cambiamento climatico, prevedono di poter far fronte alle maggiori esigenze di raffrescamento con la sola ventilazione naturale anche per gli scenari di cambiamento climatico più critici.
(van Hooff et al., 2014) (van Hooff et al., 2016)	Olanda	Gli autori prendono in esame tre tipiche residenze rappresentative del patrimonio edilizio ipotizzando sei differenti tipologie di riqualificazione avendo come riferimento soluzioni costruttive rappresentative degli anni '70 e di oggi. Assumendo come indicatore prestazionale le ore di surriscaldamento (van Hooff et al., 2014) e il fabbisogno di energia per la climatizzazione estiva ed invernale (van Hooff et al., 2016), van Hooff et al. evidenziano il consistente rischio

		indotto dal cambiamento climatico in particolare per le nuove residenze. Queste, avendo un maggiore isolamento termico, tendono a non disperdere il calore dovuto agli apporti solari causando un innalzamento della temperatura interna e del fabbisogno per raffrescamento; per gli edifici ben isolati le migliori soluzioni sono rappresentate dalle schermature degli infissi e dall'incremento della ventilazione naturale.
<i>Studi che riguardano edifici sia residenziali che non residenziali</i>		
(Asimakopoulos et al., 2012)	Grecia	Gli autori esaminano tre diversi scenari climatici e mostrano come l'incertezza delle ipotesi iniziali possa influenzare in maniera decisiva i risultati finali che, tuttavia, convergono su una drastica riduzione del fabbisogno energetico per il riscaldamento e su un altrettanto drastico aumento del consumo di energia per il raffrescamento, necessario per mantenere le condizioni di comfort interno in estate.
(Coley et al., 2012)	Regno Unito	Lo studio, confrontando i risultati delle misure di tipo non strutturali, come ad esempio l'apertura delle finestre, con i risultati delle misure di adattamento strutturali, quali l'aumento della massa termica e l'installazione delle schermature solari, mette in evidenza l'importanza del comportamento dell'utenza per affrontare in modo efficace l'incremento di temperatura nel Regno Unito.
(Wang and Chen, 2014)	USA	Wang e Chen prendono in esame le variazioni dei consumi energetici di diverse tipologie di edifici collocati in 15 città in funzione degli scenari climatici futuri previsti. I risultati delle simulazioni mostrano un aumento significativo del fabbisogno energetico netto per raffreddamento nelle zone a clima caldo, mentre per i climi più freddi si dovrebbe assistere ad una riduzione del fabbisogno energetico totale. Questo studio, inoltre, sottolinea come i risultati siano fortemente influenzati dal tipo di edificio analizzato e come, per le città più calde, un forte contributo alla riduzione del fabbisogno per raffrescamento possa venire dalla ventilazione naturale.
<i>Studi che riguardano edifici esclusivamente non residenziali (scuole, uffici, musei etc.)</i>		
(Berger et al., 2014)	Vienna (Austria)	Gli autori, analizzando edifici per uffici rappresentativi di epoche costruttive diverse, valutano gli effetti combinati delle isole di calore urbane e del cambiamento climatico sul bilancio energetico estivo, mettendo in evidenza la necessità di prendere in esame sia i fattori legati al contesto geografico e climatico che all'epoca di costruzione dell'edificio. La ricerca evidenzia come l'irraggiamento solare ed i carichi termici interni siano i principali driver dell'aumento dei consumi per raffrescamento e pertanto gli autori ipotizzano soluzioni

		volte a ridurre l'impatto.
(Kalvelage et al., 2014)	USA	Gli autori evidenziano come, oltre al prevedibile aumento di consumi energetici per il raffrescamento, dovuti all'innalzamento della temperatura, debba essere considerato attentamente anche il contributo dovuto all'incremento dell'umidità dell'aria. Lo studio dimostra che, nelle zone a clima umido, il controllo dell'umidità relativa dell'aria potrebbe essere energeticamente più dispendioso del controllo della sola temperatura.
(Waddicor et al., 2016)	Torino (Italia)	Gli autori valutano l'impatto del cambiamento climatico combinato con gli effetti dell'invecchiamento dei componenti edilizi per una biblioteca pubblica a Torino, in un arco temporale esteso fino al 2060. I risultati hanno mostrato che l'aumento della domanda di raffrescamento viene ulteriormente amplificato per effetto del progressivo degrado prestazionale dei gruppi frigoriferi e che la potenziale diminuzione della domanda di riscaldamento è vanificata, di fatto, dalla perdita di efficienza del sistema di riscaldamento. Gli autori prevedono che, tra le misure di retrofit analizzate, l'isolamento delle pareti abbia un effetto complessivo limitato, mentre risulta essere più efficace l'installazione di un gruppo frigorifero più efficiente.

La tabella suddetta evidenzia, per quanto si è potuto accertare, una assenza di studi a scala territoriale adeguata del contesto climatico italiano, ed in particolare per quanto riguarda le zone dell'Italia centrale.

De Wilde and Coley (2012), nell'ambito della revisione dei contributi scientifici prodotti sull'argomento, evidenziano come i risultati di queste ricerche concordano sui seguenti aspetti:

- Le strategie di costruzione, manutenzione e ristrutturazione svolgono un ruolo importante nel mantenere adeguate prestazioni energetiche nel lungo termine; hanno quindi un impatto significativo sull'adeguamento degli edifici ai cambiamenti climatici. Di conseguenza si evidenzia l'importanza di valutare accuratamente gli effetti del riscaldamento globale sulle strategie di progettazione e riqualificazione degli edifici al variare della tipologia e del contesto climatico.
- Molti dei regolamenti esistenti si basano su valutazioni fatte con dati climatici non aggiornati e senza tenere in considerazione adeguatamente l'evoluzione climatica futura.

Inoltre la letteratura scientifica sull'argomento mette in risalto i seguenti *research gaps* da colmare:

- Necessità di condurre ulteriori studi di impatto del cambiamento climatico al fine di coprire una gamma più ampia tipologie edilizie ed impiantistiche e di considerare una più ampia casistica di località e scenari climatici;
- .Maggiore comprensione del ruolo e degli effetti dell'isola di calore urbana;
- Necessità di studiare le implicazioni del comportamento degli occupanti;
- Approfondimento dei concetti di edificio *robusto* e *resiliente* nei confronti degli impatti dei cambiamenti climatici;
- Elaborazione di strategie di progettazione che adottino una prospettiva di adattamento degli edifici ai cambiamenti climatici sul lungo periodo;
- Analisi dei benefici derivanti da interventi di efficientamento degli impianti di climatizzazione e di illuminazione e dall'uso di elettrodomestici e apparecchiature ICT efficienti;
- Sviluppo di metodologie e criteri di valutazione per la classificazione delle strategie di mitigazione e adattamento degli edifici.

1.2 Genesi del DM 26/6/2015: dal progetto TABULA allo standard nZEB

Come anticipato, negli ultimi anni l'Unione Europea si è fatta promotrice di programmi e politiche per l'incremento dell'efficienza energetica degli edifici. In tale contesto sono stati attivati alcuni progetti di ricerca riassunti nella successiva Tabella 1-2.

Tabella 1-2 – Titoli e obiettivi dei progetti europei di riferimento per la presente ricerca.

<p>Titolo: TABULA (<i>Typology Approach for Building Stock Energy Assessment</i>, 2009-2012) ed EPISCOPE (<i>Energy Performance Indicator Tracking Schemes for the Continuous Optimisation of Refurbishment Processes in European Housing Stocks</i>, 2013-2016)</p>
<p>Obiettivi: creare una struttura armonizzata delle tipologie edilizie europee per la valutazione energetica dei patrimoni edilizi residenziali esistenti, la stima del miglioramento della prestazione energetica a seguito di interventi di efficientamento, nonché il successivo monitoraggio dell'efficacia degli interventi applicabili su vasta scala per la mitigazione delle emissioni climalteranti (Institut Wohnen und Umwelt GmbH, 2016a, 2016b)</p>
<p>Titolo: RePublic_ZEB (<i>Refurbishment of the Public Building Stock Towards nZEB</i>, 2013-2016)</p>
<p>Obiettivi: supportare i paesi del Sud Europa, accomunati da contesti climatici simili, nell'identificazione, sviluppo e diffusione di soluzioni tecniche concretamente applicabili per la</p>

riqualificazione energetica del patrimonio edilizio pubblico, compreso quello residenziale, verso lo standard nZEB (CTI - Comitato Termotecnico Italiano, 2016a).

Titolo: STREPIN (*Strategia per la riqualificazione energetica del parco immobiliare*) e PANZEB (Piano per l'incremento degli edifici a energia quasi zero)

Obiettivi: Definizione degli orientamenti e delle linee di sviluppo nazionali per incrementare il numero degli edifici ad energia quasi zero tramite le misure di regolazione e di incentivazione disponibili e valutazione del risparmio energetico conseguibile nel settore civile grazie alle misure di promozione dell'efficienza energetica già attivate e al loro potenziamento in un'ottica di ottimizzazione dei costi. Questi progetti sono stati promossi dal Ministero dello Sviluppo Economico, al fine di adempiere agli obblighi previsti dalla suddette direttive europee (Ministero dello Sviluppo Economico, 2015a, 2015b).

1.2.1 Il Progetto TABULA-EPISCOPE

Di particolare importanza risultano i progetti TABULA ed EPISCOPE, i cui risultati e documenti sono stati assunti come riferimento per la presente ricerca. Questi progetti sono stati sviluppati a livello nazionale dal Gruppo di Ricerca TEBE del Dipartimento Energia del Politecnico di Torino.

L'obiettivo del progetto TABULA è la creazione di un modello di data base comune (Tipologia Edilizia Nazionale) contenente edifici-tipo rappresentativi dei parchi edilizi residenziali nazionali. Tali obiettivi nascono dalla necessità di valutare i fabbisogni energetici di interi patrimoni edilizi nazionali al fine di valutare gli effetti, in termini di riduzione dei consumi, dell'adozione di misure di efficienza energetica e orientare efficacemente le scelte di politica energetica dei governi (Loga et al., 2012). Le Tipologie Edilizie Nazionali sono costituite da uno schema di classificazione del parco edilizio (Matrice) basato sull'epoca di costruzione e sulla dimensione/tipologia edilizia come mostrato in Figura 1-1. Sulla base di questo schema sono stati selezionati edifici-tipo (reali o virtuali) rappresentativi delle caratteristiche tipologiche e tecnologiche più diffuse ("tipiche" sulla base di valutazioni statistiche o di analisi storiche) all'interno di ciascuna classe. Nel caso italiano l'individuazione degli edifici-tipo è avvenuta all'interno del patrimonio edilizio residenziale della Regione Piemonte considerato rappresentativo della zona climatica E.

CLASSE DI DIMENSIONE EDILIZIA

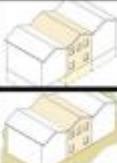
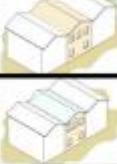
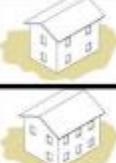
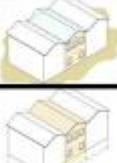
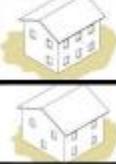
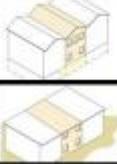
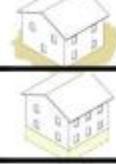
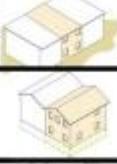
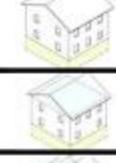
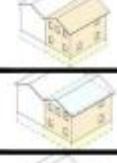
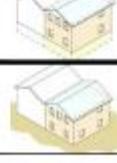
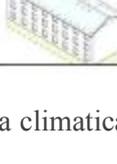
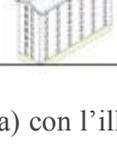
<i>Area climatica media</i>		CASE MONOFAMILIARI	CASE A SCHIERA	EDIFICI MULTIFAMILIARI	BLOCCHI DI APPARTAMENTI
CLASSE DI EPOCA DI COSTRUZIONE	1 Fino al 1900				
	2 1901-1920				
	3 1921-1945				
	4 1946-1960				
	5 1961-1975				
	6 1976-1990				
	7 1991-2005				
	8 Dopo il 2005				

Figura 1-1 - Matrice della Tipologia Edilizia italiana (area climatica media) con l'illustrazione degli edifici-tipo (Corrado et al., 2014).

Ciascun edificio rappresenta quindi un determinato periodo di costruzione e una specifica dimensione/tipologia. Coerentemente con gli obiettivi della ricerca su ognuno degli edifici-tipo componenti la Tipologia Edilizia Nazionale sono stati valutati gli effetti di possibili misure di efficientamento dell'involucro edilizio e degli impianti di climatizzazione e produzione dell'acqua calda sanitaria. Le misure di efficientamento analizzate sono articolate in due livelli di complessità e prestazione:

- la riqualificazione "tipica" coincidente con l'applicazione di misure comunemente utilizzate per la riqualificazione energetica degli edifici nella nazione di riferimento, caratterizzate da livelli prestazionali che soddisfano la normativa corrente.
- la riqualificazione "avanzata" consistente in un insieme di interventi che riflettono le migliori tecnologie disponibili, il cui livello prestazione di riferimento è quello delle case passive.

Le potenzialità di risparmio energetico sono state valutate utilizzando una metodologia comune a tutte le nazioni partecipanti al progetto, basata sulle ipotesi di condizioni di

utilizzo e climatiche standardizzate derivanti dalle norme tecniche europee a supporto della Direttiva sulla Prestazione Energetica degli edifici (EPBD, 2002/91/CE).

I risultati principali del progetto TABULA sono stati sistematizzati in due importanti prodotti della ricerca:

- Il Fascicolo sulla Tipologia Edilizia Italiana (Corrado et al., 2014) contenente:
 - Dati statistici sulle caratteristiche tipologiche e tecnologiche del patrimonio edilizio nazionale;
 - Le schede illustrative degli Edifici-Tipo che riportano le caratteristiche prestazionali termo-fisici dei componenti edili ed impiantistici, oltre alle prestazioni raggiungibili con gli interventi di efficientamento (Figura 1-2);
 - I parametri termo-fisici dei componenti d'involucro e i parametri prestazionali degli impianti termici maggiormente diffusi sul territorio nazionale in funzione dell'epoca di costruzione e della tipologia edilizia.
- Webtool delle tipologie edilizie (Institut Wohnen und Umwelt GmbH, 2016c) costituito da uno strumento web attraverso il quale è possibile consultare online e in modo interattivo la tipologia nazionale di ciascun paese oltre alle informazioni di corredo sulla distribuzione statistica delle tipologie e degli impianti termici e sulle prestazioni energetiche medie. In particolare l'utente selezionando un tipo di edificio e uno o più interventi da applicare può effettuare automaticamente una valutazione preliminare del miglioramento delle prestazioni energetiche e della conseguente riduzione dell'emissione di biossido di carbonio (Figura 1-3).

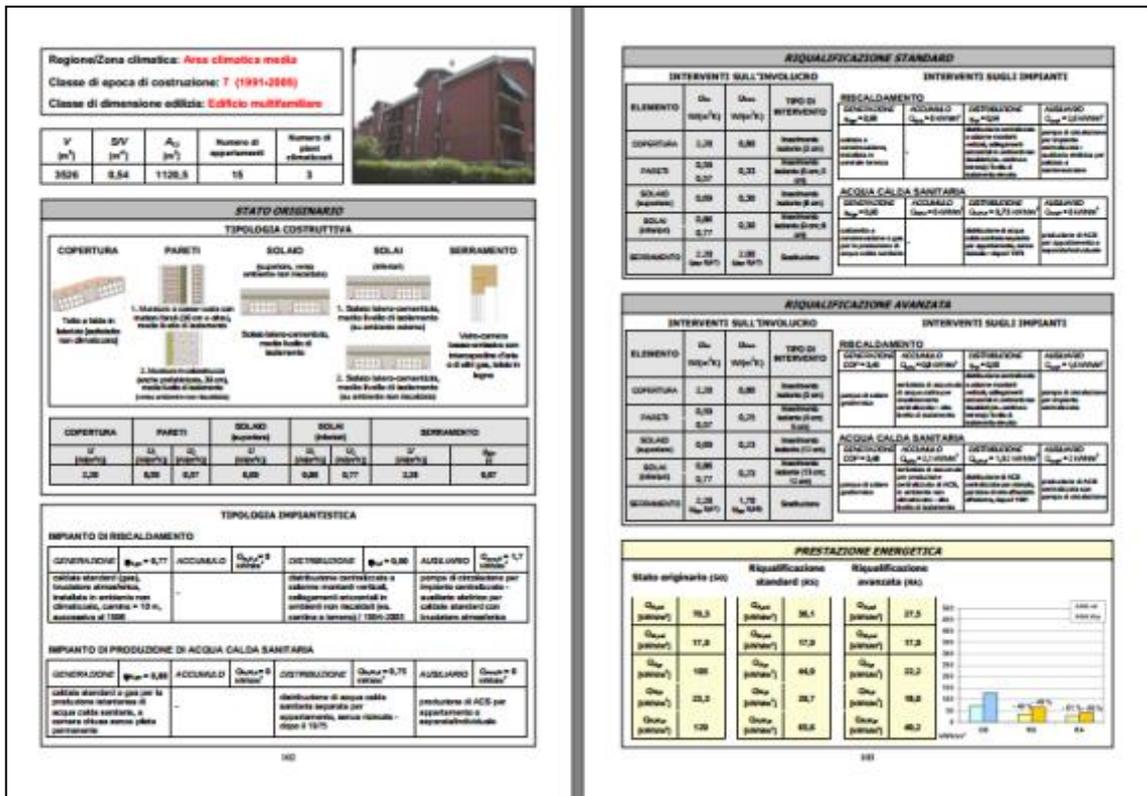


Figura 1-2 – Esempio di scheda illustrativa degli edifici-tipo (Corrado et al., 2014)

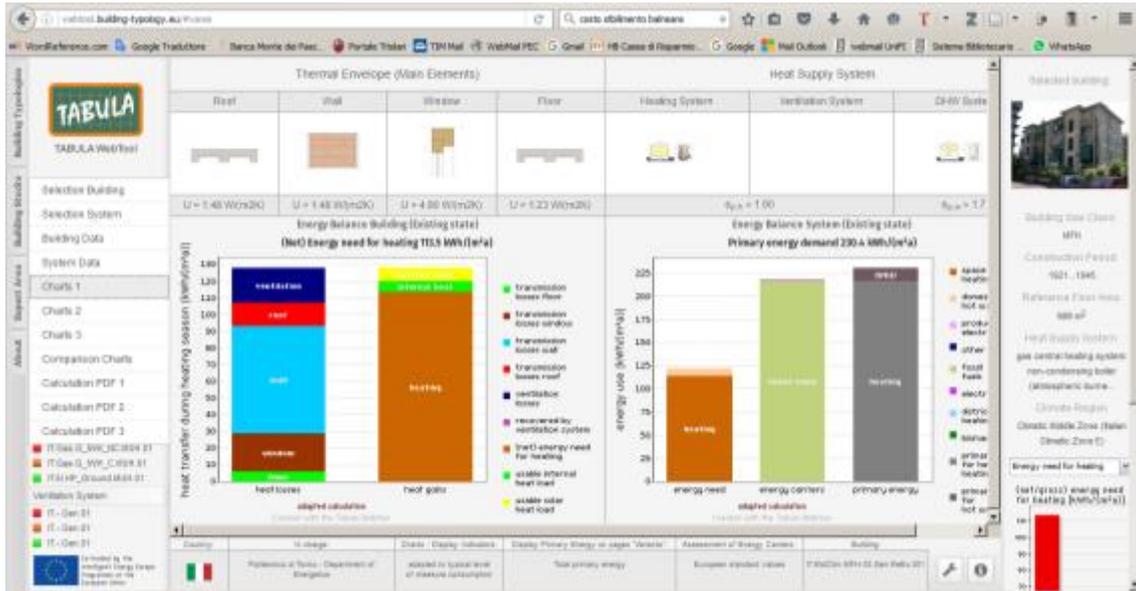


Figura 1-3 – Schermata esemplificativa di TABULA Webtool.

I risultati del Progetto TABULA offrono diverse opportunità di utilizzo :

- I singoli edifici tipo possono essere impiegati come campioni esemplificativi per ottenere una prima valutazione di massima dei risparmi conseguibili su edifici

reali appartenenti alla medesima classe tipologico-dimensionale ed di epoca di costruzione.

- L'intero set di edifici-tipo costituente la Tipologia Edilizia Nazionale, corredato dalle informazioni aggiuntive sulla frequenza delle tipologie edilizie ed impiantistiche, può essere impiegato come modello per la stima della prestazione energetica del parco edilizio nazionale, al variare degli scenari di intervento;
- La metodologia di *stock aggregation* dei patrimoni edilizi sviluppata nel progetto TABULA può essere applicata alla classificazione e valutazione energetica di patrimoni edilizi locali.

Il progetto EPISCOPE costituisce la continuazione del progetto TABULA e ha i seguenti obiettivi:

- ampliamento della Tipologia Edilizia Nazionale con edifici di nuova costruzione (posteriori al 2005) e aggiornamento dello Webtool TABULA;
- applicazione di una "Azione Pilota" locale finalizzata a:
 - monitoraggio dei processi di riqualificazione energetica del parco edilizio residenziale della Regione Piemonte e alla valutazione dei risparmi conseguiti;
 - verifica degli obiettivi di riqualificazione energetica dei parchi edilizi residenziali conseguibili nel medio e lungo periodo mediante la simulazione energetica di diversi scenari di intervento applicati al patrimonio regionale del Piemonte;
 - messa a punto di scenari di riqualificazione energetica utili ad indirizzare la politica energetica locale nel breve, medio e lungo periodo.

La Tipologia Edilizia Nazionale è stata ampliata con quattro Edifici-Tipo (casa monofamiliare, casa a schiera, edificio multifamiliare e blocco di appartamenti) rappresentativi delle nuove costruzioni. Questi modelli sono stati analizzati dal punto di vista energetico, prendendo in considerazione più varianti prestazionali del sistema edilizio e del sistema impiantistico che vanno da un livello base coincidente con il soddisfacimento dei requisiti minimi stabiliti dalla legislazione nazionale attuale (DM 26/6/2015) ad un livello avanzato coincidente con il livello prestazionale richiesto dalla legislazione nazionale (DM 26/6/2015) per gli edifici ad energia quasi zero (nZEB). Questo tipo di analisi consente di valutare l'impatto che l'adozione dei diversi livelli di

prestazione energetica previsti dalla legislazione corrente, potrebbe avere sul parco edilizio residenziale di nuova costruzione. I risultati del Progetto EPISCOPE sono costituiti da analisi di scenario rivolte agli amministratori pubblici responsabili delle politiche di risparmio energetico e ai consulenti energetici che possono utilizzare le Tipologie-Edilizie come supporto alle valutazioni preliminari per la selezione e progettazione delle misure di efficienza energetica da applicare alle nuove costruzioni (Corrado et al., 2014; Corrado and Ballarini, 2015; Episcopo Project Team, 2016).

1.2.2 Applicazione nazionale della metodologia europea per la definizione dei requisiti minimi di prestazione energetica e DM 26/6/2015

La Direttiva Europea 2010/31/UE richiede agli Stati Membri di ridefinire i requisiti di prestazione energetica minimi degli edifici nuovi e degli edifici esistenti oggetto di ristrutturazioni edilizie o impiantistiche. Contestualmente la Direttiva prevede che sia fissato un livello di prestazione energetica particolarmente avanzato che caratterizzi gli edifici ad energia quasi zero (*nZEB*). La stessa Direttiva prevede che detti requisiti prestazionali siano definiti in un'ottica di raggiungimento di livelli ottimali di prestazione energetica in funzione dei costi. In particolare il livello ottimale di prestazione energetica è definito come il livello “che conduce al costo più basso durante il ciclo di vita economico stimato dell'edificio”. A supporto delle elaborazioni dei singoli stati a cui è demandata la definizione dei parametri di input dei calcoli quali la selezione degli edifici campione, la definizione tecnica ed economica delle misure di efficienza energetica (EEM) e la determinazione della durata del ciclo di vita economico dell'intero edificio o degli elementi tecnici considerati nelle valutazioni, la Commissione Europea ha emanato il Regolamento delegato UE n. 244/2012 (corredato dalle relative Linee guida) che fornisce il quadro metodologico di riferimento per il calcolo dei livelli ottimali in funzione dei costi per i requisiti minimi di prestazione energetica degli edifici e degli elementi edilizi.

Il gruppo di lavoro italiano attivato dal Ministero dello Sviluppo Economico (MSE) a cui hanno partecipato il Comitato Termotecnico Italiano (CTI), ENEA e Ricerca sul Sistema Energetico Spa (RSE) a curato l'applicazione nazionale di tale metodologia ed ha prodotto una relazione illustrativa delle ipotesi di calcolo e dei risultati prodotti destinata alla Commissione Europea che ha costituito uno dei riferimenti fondamentali per lo sviluppo della presente ricerca (Ministero dello Sviluppo Economico, 2013).

In estrema sintesi la metodologia europea prevede le seguenti fasi di calcolo:

1. Definizione di un numero adeguato di edifici-tipo (comprehensive di abitazioni monofamiliari, plurifamiliari e uffici) che riflettano le specificità e le articolazioni del parco edilizio nazionale;
2. Identificazione delle misure di efficienza energetica combinabili in pacchetti e varianti da applicare sia singolarmente che in modo coordinato a ciascun edificio-tipo individuato. Le misure di efficienza energetica riguardano tutti i servizi che contribuiscono a determinare il fabbisogno energetico dell'edificio e sono articolate in un numero sufficiente di livelli prestazionali;
3. Calcolo del fabbisogno di energia primaria derivante dall'applicazione delle combinazioni di misure di efficienza energetica agli edifici-tipo. La metodologia di calcolo della prestazione energetica deve fare riferimento alle pertinenti norme CEN e ai metodi di calcolo nazionale derivati o equivalenti;
4. Calcolo del costo globale in termini di valore attuale netto di ciascuna combinazione di misure di efficienza energetica per ciascun edificio-tipo⁶. La valutazione, sulla base del modello della norma tecnica UNI EN 15459 (UNI - Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 2008a), deve tenere conto dei costi di investimento legati all'installazione/costruzione di tutti gli elementi tecnici edili e impiantistici che influenzano la prestazione energetica, dei costi di manutenzione di questi elementi, dei costi di gestione (consumi energetici) e degli eventuali costi di smaltimento. Il calcolo del costo globale può essere condotto secondo due diverse prospettive: quella del cittadino che deve sostenere la spesa (prospettiva finanziaria) e quella dello stato che deve minimizzare i costi economici e ambientali (prospettiva macroeconomica). La prima include le imposte e considera tassi di sconto più elevati. La seconda invece include oltre alle voci di costo suddette anche gli oneri derivanti dall'emissioni di gas a effetto serra.

⁶ Mentre la durata del ciclo vita degli edifici e degli elementi tecnici può essere fissato a discrezione dei singoli gruppi di lavoro nazionali, il periodo di calcolo è fissato in 30 anni per gli edifici residenziali e 20 per quelli destinati ad ufficio;

5. Svolgimento di un'analisi di sensibilità per valutare l'influenza sui risultati del calcolo dei parametri economici di più difficile previsione, quali i tassi di sconto e gli scenari di evoluzione dei prezzi dell'energia;
6. Derivazione di un livello ottimale di prestazione energetica in funzione dei costi per ciascun edificio di riferimento mediante il confronto fra il costo globale e l'energia primaria che caratterizza ciascun pacchetto/variante di misure di efficienza energetica;

L'applicazione della metodologia effettuata dal gruppo di lavoro italiano (Ministero dello Sviluppo Economico, 2013) ha implementato i seguenti aspetti specifici:

- Gli edifici di riferimento nuovi ed esistenti utilizzati per i calcoli (edificio monofamiliare, piccolo condominio, grande condominio e ufficio) e sono stati desunti dalla Tipologia Edilizia Nazionale sviluppata nel progetto Tabula salvo gli edifici per ufficio sviluppati sulla base di altre fonti;
- Per ognuna delle **misure di efficienza energetica** sono stati definiti più livelli di prestazione energetica, dei quali il secondo rappresenta la conformità alle prescrizioni energetiche in vigore all'epoca della redazione del documento, il primo è peggiorativo, gli altri migliorativi (Figura 1-4). Al fine di prendere in considerazione l'interazione tra le differenti misure di efficienza energetica, queste sono state combinate in pacchetti e/o varianti, per creare sinergie volte ad ottenere risultati migliori rispetto a quelli ottenibili con misure singole;
- I **tassi di sconto** considerati sono stati 4% e 5% per la prospettiva finanziaria e 3% e 4% per la prospettiva macroeconomica;
- I **prezzi delle misure di efficienza energetica** per gli edifici nuovi o per la riqualificazione di quelli esistenti sono stati desunti da prezziari ufficiali (DEI – Tipografia del Genio Civile) o mediante indagine di mercato per gli elementi tecnici o le lavorazioni non reperibili nei prezziari.
- I **prezzi dei vettori energetici** sono stati calcolati sulla base delle elaborazioni dell'Autorità per l'Energia Elettrica e il Gas (AEEG) facendo riferimento alle condizioni del servizio di maggior tutela includendo accise e imposte nazionali e locali.
- Per quanto riguarda l'**evoluzione dei prezzi dei vettori energetici**, seguendo le indicazioni del Regolamento UE n. 244/2012, il Gruppo di Lavoro italiano ha fatto riferimento alle previsioni ufficiali della Commissione Europea

sviluppate con il modello PRIMES (Capros et al., 2010), estrapolando le tendenze indicate oltre il 2030 fino alla fine del periodo di calcolo;

- Il **calcolo della prestazione energetica** (energia primaria totale per riscaldamento, raffreddamento, ventilazione, acqua calda e illuminazione) delle diverse combinazioni e varianti di misure di efficienza energetica è stato condotto secondo il metodo di calcolo in regime semi-stazionario definito dalle specifiche tecniche UNI/TS 11300 (norme tecniche di riferimento nazionale per la valutazione energetica degli edifici) e, in aggiunta, secondo una metodologia di tipo dinamico semplificato, sulla base della norma UNI EN ISO 13790, opportunamente integrata per determinare i rendimenti degli impianti;
- Per quanto riguarda l'**identificazione dei livelli di prestazione energetica ottimali**, che cioè conducono al valore minimo di costo globale per ciascun edificio-tipo analizzato, il Gruppo di Lavoro italiano, in considerazione della ingente quantità di varianti di misure di efficienza energetica considerate, ha elaborato una procedura di ottimizzazione che partendo da diversi scenari di intervento di base procede per ottimi parziali successivi, ottenuti modificando i livelli prestazionali delle singole misure, fino ad individuare la configurazione che permette di ridurre maggiormente il costo globale. L'operazione si ripete iterativamente fino all'individuazione dell'ottimo finale (Figura 1-5 (a)). Con l'applicazione di tale processo ai diversi scenari iniziali sono stati ottenuti grafici del tipo di Figura 1-5 (b) in cui i punti più bassi corrispondono allo scenario per il quale si ottiene il minore costo globale mentre i corrispettivi valori di energia primaria costituiscono un "intervallo ottimale".

Tipologia: Edificio Piccolo Condominio										
Epoca: 1946-1976										
n.	EEM	Parameter id.	Symbol	N	Level of EEM					
					1	2	3	4	5	
1	External wall thermal insulation (EIFS-EW): exterior insulation finishing system (cappotto)	Trasmittanza termica (W/m ² K)	U _p	5	VEDI TABELLA 3.14					
2	External wall thermal insulation (CWI-EW): Cavity wall insulation (insufflazione)									
3	Roof thermal insulation (INS-R)									
4	Floor thermal insulation (INS-F)									
5	Window thermal insulation (INS-W)									
6	Solar shading systems (SHAD)	Trasmittanza di energia solare totale	g _{tot}	4	0,77	0,50	0,20	0,10	-	
7	High efficiency chiller (CHIL)	Indice di efficienza energetica in condizioni di progetto	EER	3	3	3,69	4,2	-	-	
8	Efficiency Heat Generator System (GHS)	Rendimento di generazione	η _{gs}	5	0,88	Tab 3.15	1,00	1,70	1,90	
9	High efficiency systems for DHW (HES-DHW)	Rendimento del sistema al 100% del carico	η _{gs,DHW}	3	0,88	0,93	1,00	-	-	
10	Efficiency Heat Generator System for heating and hot water	Rendimento di generazione	η _{gs}	5	0,88	0,93	1,00	-	-	
11	Heat pump for heating, cooling and hot water	Coefficiente di prestazione	COP	3	2,5	3,1	4,2	-	-	
		Indice di efficienza energetica in condizioni di progetto	EER	3	2,3	2,9	3,1	-	-	
12	Thermal solar systems (SOL)	m ² di collettori solari	m ²	3	7	12	17	-	-	
13	PV system (PV)	Potenza di picco installata	kWp	4	2,5	5	7,5	10	-	
14	Energy recovery ventilation system (ERVS)	Rendimento del recuperatore di calore	η _v	x	x	x	x	-	-	
15	Improving Control System (ICS)	Rendimento di regolazione e controllo	η _{icr}	3	0,94	0,97	0,995	-	-	
16	Lighting power density (LPD)	Densità della potenza di illuminazione installata (W/m ²)	PN	x	x	x	x	-	-	
17	Lighting control systems (LCS)	Fattore di dipendenza dall'occupazione	F _o	x	x	x	x	-	-	
		Fattore di dipendenza dal daylight	F _d	x	x	x	x	-	-	
		Fattore di illuminamento costante	F _c	x	x	x	x	-	-	

EEM		U[W/m ² K]					U[W/m ² K]				
		Zona climatica B					Zona climatica E				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Pareti verticali perimetrali	INS-EW	0,65	0,48	0,42	0,36	0,30	0,45	0,34	0,29	0,25	0,20
Copertura	INS-R	0,50	0,38	0,35	0,33	0,30	0,40	0,30	0,27	0,23	0,20
Solaio piano terreno	INS-F	0,65	0,49	0,43	0,36	0,30	0,45	0,33	0,29	0,24	0,20
Serramenti	INS-W	5,80	3,00	2,60	2,20	1,80	5,00	2,20	1,90	1,60	1,30

Figura 1-4 – Esempio delle misure di efficienza energetica applicate ad uno degli edifici-tipo per il calcolo dei livelli ottimali di prestazione energetica (Ministero dello Sviluppo Economico, 2013)

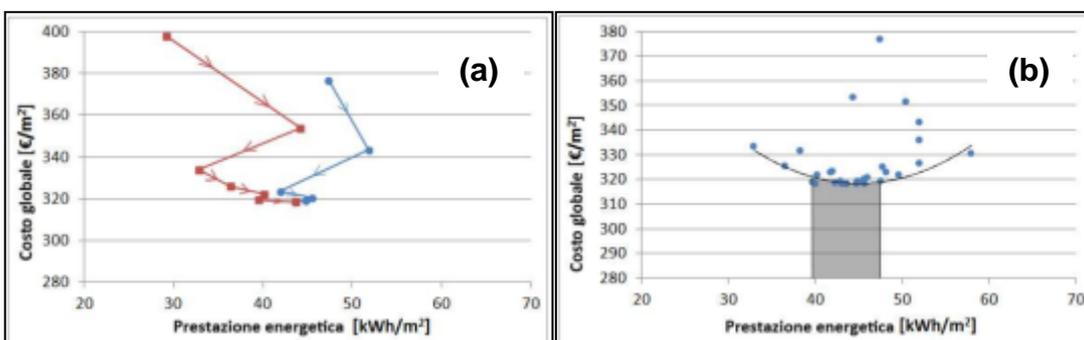


Figura 1-5 - Percorso di ottimizzazione per due differenti scenari iniziali (a) e individuazione del livello ottimale di prestazione energetica (energia primaria) in funzione dei costi (b) (Ministero dello Sviluppo Economico, 2013)

In linea generale, i risultati dello studio riferiti agli edifici di nuova costruzione o interessati da ristrutturazione importante, se confrontati con i precedenti requisiti di

prestazione energetica in vigore all'epoca della redazione (D.Lgs 192/2005 e s.m.i) hanno evidenziato dei significativi margini di miglioramento e hanno confermato la necessità di adeguamento dei livelli prestazionali minimi di riferimento dal 2010 al 2015.

Il D.M. 26 Giugno 2015 (decreto attuativo della Legge 90/2013, che recepisce a livello nazionale la direttiva 2010/31/UE) che ha introdotto i requisiti minimi di prestazione energetica per gli edifici è stato redatto, sulla base dei livelli ottimali di prestazione energetica individuati da questo studio.

Rimandando ai testi di sintesi esistenti (ANIT, 2016; Erba, 2015) per una analisi completa dei contenuti del Decreto, si evidenziano di seguito alcuni aspetti richiamati nei successivi capitoli. Per quanto riguarda gli interventi di efficientamento energetico dell'involucro edilizio che non prevedano la contestuale ristrutturazione completa dell'impianto termico (ristrutturazioni importanti di secondo livello e riqualificazioni energetiche) il decreto aggiorna i precedenti limiti (D.P.R 59/2009, 2009) di trasmittanza delle strutture opache e trasparenti di involucro, articolandoli in due livelli contraddistinti da prestazioni energetiche crescenti e data di entrata in vigore differenziata: 2015 per il livello prestazionale più basso e 2021 (2019 per gli edifici pubblici) per il livello più alto (Figura 1-6).

TABELLA 1 (Appendice B) Trasmittanza termica U massima delle <u>strutture opache verticali</u> , verso l'esterno soggette a riqualificazione		
Zona climatica	U _{limite} [W/m ² K]	
	Dal 1° ottobre 2015	Dal 1° gennaio 2021
A-B	0,45	0,40
C	0,40	0,36
D	0,36	0,32
E	0,30	0,28
F	0,28	0,26

TABELLA 2 (Appendice B) Trasmittanza termica U massima delle strutture opache orizzontali o inclinate di <u>copertura</u> , verso l'esterno soggette a riqualificazione		
Zona climatica	U _{limite} [W/m ² K]	
	Dal 1° ottobre 2015	Dal 1° gennaio 2021
A-B	0,34	0,32
C	0,34	0,32
D	0,28	0,26
E	0,26	0,24
F	0,24	0,22

TABELLA 3 (Appendice B) Trasmittanza termica U massima delle strutture opache orizzontali di <u>pavimento</u> , verso l'esterno soggette a riqualificazione		
Zona climatica	U _{limite} [W/m ² K]	
	Dal 1° ottobre 2015	Dal 1° gennaio 2021
A-B	0,48	0,42
C	0,42	0,38
D	0,36	0,32
E	0,31	0,29
F	0,30	0,28

TABELLA 4 (Appendice B) Trasmittanza termica U massima delle <u>chiusure tecniche trasparenti</u> e opache e dei cassonetti (*), comprensivi degli infissi, verso l'esterno e verso ambienti non climatiz. soggette a riqualificazione		
Zona climatica	U _{limite} [W/m ² K]	
	Dal 1° ottobre 2015	Dal 1° gennaio 2021
A-B	3,20	3,00
C	2,40	2,00
D	2,10	1,80
E	1,90	1,40
F	1,70	1,00

Figura 1-6 - Trasmittanze termiche limite per edifici esistenti – Allegato B del DM 26/6/2015 (ANIT, 2016)

Come si può notare dalla Tabella 1-3, i nuovi limiti per il 2015, per alcune tipologie di struttura, fra cui le pareti esterne verticali non introducono modifiche rispetto ai precedenti valori.

Tabella 1-3 – Confronto fra vecchi (DPR59/2009) e nuovi limiti (DM 26/6/2015) di trasmittanza per la riqualificazione energetica dell'involucro edilizio

	Zona C		Zona D	
	DPR 59/2009 (lim. 2010)	DM 26/6/2015 (lim. 2015)	DPR 59/2009 (lim. 2010)	DM 26/6/2015 (lim. 2015)
Pareti	0.40	0.40	0.36	0.36
Copertura	0.38	0.34	0.32	0.28
Pavimento	0.42	0.42	0.36	0.36
Infissi	2.6	2.4	2.4	2.1

Per le medesime categorie di interventi, il decreto ha introdotto l'obbligo delle schermature solari per gli infissi con orientamento da Est a Ovest passando per Sud imponendo ex-novo un limite di 0,35 per il fattore di trasmissione solare totale g_{gl+sh} ⁷. Per quanto riguarda gli interventi di riqualificazione energetica che prevedono la sostituzione del generatore dell'impianto di climatizzazione, il decreto stabilisce i seguenti limiti prestazionali:

- Rendimento termico utile nominale (η_U) dei generatori di calore a combustibile gassoso o liquido: $\geq 90+2\log P_n$;
- Coefficiente di prestazione (COP) delle pompe di calore a compressione di vapore con motore elettrico aria-aria servizio riscaldamento: **3,5**;
- Indice di efficienza energetica (EER) delle pompe di calore a compressione di vapore con motore elettrico aria-aria servizio raffrescamento: **3,0**;
- Efficienze medie (η_{gn}) dei sottosistemi di generazione come riportate in Figura 1-7.

I precedenti valori di prestazione energetica sono stati impiegati per definire le caratteristiche prestazionali degli interventi di riqualificazione standard.

⁷ g_{gl+sh} (-) è il valore del fattore di trasmissione solare totale delle componenti finestrate considerando il contributo delle schermature solare mobili applicate in modo solidale con l'involucro edilizio.

TABELLA 8 (Appendice A)				
Efficienze medie η_{gn} dei sottosistemi di generazione dell'edificio di riferimento per la produzione di energia termica per i servizi di H, C, W e per la produzione di energia elettrica in situ.				
Sottosistemi di generazione:	Produzione di energ. termica			Produzione di energia elettrica in situ
	H	C	W	
Generatore a combustibile liquido	0,82	-	0,80	-
Generatore a combustibile gassoso	0,95	-	0,85	-
Generatore a combustibile solido	0,72	-	0,70	-
Generatore a biomassa solida	0,72	-	0,65	-
Generatore a biomassa liquida	0,82	-	0,75	-
Pompa di calore a compressione di vapore con motore elettrico	3,00	(*)	2,50	-
Macchina frigorifera a compressione di vapore a motore elettrico	-	2,50	-	-
Pompa di calore ad assorbimento	1,20	(*)	1,10	-

Figura 1-7 – Estratto dalla Tabella 8 dell'Allegato A del DM 26/6/2015

Per gli interventi di nuova costruzione e assimilabili, il decreto prevede, fra gli altri adempimenti, una verifica del fabbisogno di energia primaria totale e dei fabbisogni di energia termica utile dell'edificio progettato mediante il confronto con i corrispondenti fabbisogni determinati attribuendo all'*edificio di riferimento*⁸ i parametri di prestazione energetica riportati nell'allegato A del DM 26/6/15. Fra questi, quelli relativi alla trasmittanza termica degli elementi d'involucro sono riportati nella Figura 1-8, in quanto successivamente impiegati nella presente ricerca per la definizione delle caratteristiche prestazionali degli interventi di riqualificazione più avanzati.

⁸ Per "edificio di riferimento" si intende un edificio identico a quello reale (o di progetto) oggetto di verifica per quanto riguarda la geometria, l'orientamento, l'ubicazione territoriale, la destinazione d'uso, la situazione al contorno e avente caratteristiche termiche e parametri energetici predeterminati riportati nel DM 26/6/15 ed elaborati sulla base delle ricerche descritte nel presente capitolo.

TABELLA 1 (Appendice A) Trasmittanza termica U di riferimento delle strutture opache verticali , verso l'esterno, gli ambienti non riscaldati o contro terra		
Zona climatica	U _{rif} [W/m ² K]	
	Dal 1° ottobre 2015	Dal 1° gennaio 2019/2021
A-B	0,45	0,43
C	0,38	0,34
D	0,34	0,29
E	0,30	0,26
F	0,28	0,24

TABELLA 2 (Appendice A) Trasmittanza termica U delle strutture opache orizzontali o inclinate di copertura , verso l'esterno e gli ambienti non riscaldati		
Zona climatica	U _{rif} [W/m ² K]	
	Dal 1° ottobre 2015	Dal 1° gennaio 2019/2021
A-B	0,38	0,35
C	0,36	0,33
D	0,30	0,26
E	0,25	0,22
F	0,23	0,20

TABELLA 3 (Appendice A) Trasmittanza termica U delle strutture opache orizzontali di pavimento , verso l'esterno, gli ambienti non riscaldati o contro terra		
Zona climatica	U _{rif} [W/m ² K]	
	Dal 1° ottobre 2015	Dal 1° gennaio 2019/2021
A-B	0,46	0,44
C	0,40	0,38
D	0,32	0,29
E	0,30	0,26
F	0,28	0,24

TABELLA 4 (Appendice A) Trasmittanza termica U delle chiusure tecniche trasparenti e opache e dei cassonetti, comprensivi degli infissi, verso l'esterno e ambienti non riscaldati		
Zona climatica	U _{rif} [W/m ² K]	
	Dal 1° ottobre 2015	Dal 1° gennaio 2019/2021
A-B	3,20	3,00
C	2,40	2,20
D	2,00	1,80
E	1,80	1,40
F	1,50	1,10

Figura 1-8 – Valori di trasmittanza termica per la caratterizzazione gli elementi d'involucro dell'edificio di riferimento

2 Condizioni climatiche di riferimento

A seguito di un'analisi statistica preliminare, volta ad individuare la distribuzione di popolazione all'interno delle diverse zone climatiche italiane, sono state individuate due località toscane, Firenze (centro città) e San Vincenzo (provincia di Livorno) sufficientemente rappresentative delle zone climatiche ufficiali “C” e “D”⁹, nonché delle diverse realtà climatiche della Toscana interna e costiera, rispettivamente identificabili come zone “temperata sublitoranea” e “temperata calda” (Pinna, 1978). Per queste località a partire dai dati climatici per le simulazioni energetiche, aggiornati (CTI - Comitato Termotecnico Italiano, 2016b) (ItMeteoData, 2016), e delle proiezioni climatiche (prodotte nell'ambito del 5° Rapporto di Valutazione dell'Intergovernmental Panel on Climate Change), sono stati elaborati i *file* climatici necessari alle successive fasi di valutazione energetica (Guan, 2009).

Ai fini dell'analisi delle condizioni al contorno climatiche è stata valutata, in via preliminare, la possibile influenza dell'effetto isola di calore urbana sui dati impiegati nella ricerca

2.1 Il cambiamento climatico in area mediterranea

L'area Mediterranea, formata dall'omonimo bacino marino e dalle terre emerse che lo circondano, è caratterizzata da condizioni climatiche particolari che non possono essere spiegate facendo riferimento alla sola influenza del mare (Lionello et al., 2012); un ruolo primario è, infatti, giocato dall'interazione fra i regimi circolatori delle medie latitudini e quelli subtropicali e dalla complessa morfologia dell'area (Gualdi et al., 2013). Di fatto l'area mediterranea giace nella zona di transizione fra il clima arido del Nord Africa, caratterizzato dalla presenza del più grande deserto del mondo, il Sahara, e i climi umidi, temperati o freddi, caratteristici dell'Europa centrale. Il clima che ne risulta è caratterizzato da inverni umidi e miti ed estati secche. In particolare le temperature medie del mese più caldo sono comprese fra 25°C e 28°C, mentre nel mese più freddo la temperatura oscilla fra 6°C e 13°C. In base alla tradizionale classificazione climatica di Köppen il clima strettamente Mediterraneo è definito come un clima temperato delle medie latitudini con estate secca, che può essere alternativamente calda

⁹ Per la classificazione climatica dei comuni italiani ai fini della valutazione energetica degli edifici e la definizione dei gradi giorno si faccia riferimento al Decreto del presidente della Repubblica n. 412 del 26 agosto 1993.

(sottotipo *Csa*) e tiepida (sottotipo *Csb*). Tuttavia, come si può vedere nella Figura 2-1 questi due sottotipi coprono solo una frazione della regione Mediterranea. Infatti, considerando una zona compresa entro una distanza di 200 km dalle coste, entro cui ricadono la maggior parte delle aree della regione, sono presenti numerosi tipi di climi, da quello arido subtropicale in Nord Africa a quello nivale d'alta quota nelle Alpi, che danno luogo a notevoli contrasti. E' da notare, soprattutto, come una notevole porzione della regione collocata a nord del bacino Mediterraneo sia caratterizzata anche da climi temperati delle medie latitudini senza stagione secca (sottotipi *Cfa* con estate calda e *Cfb* con estate tiepida) (Lionello et al., 2012).

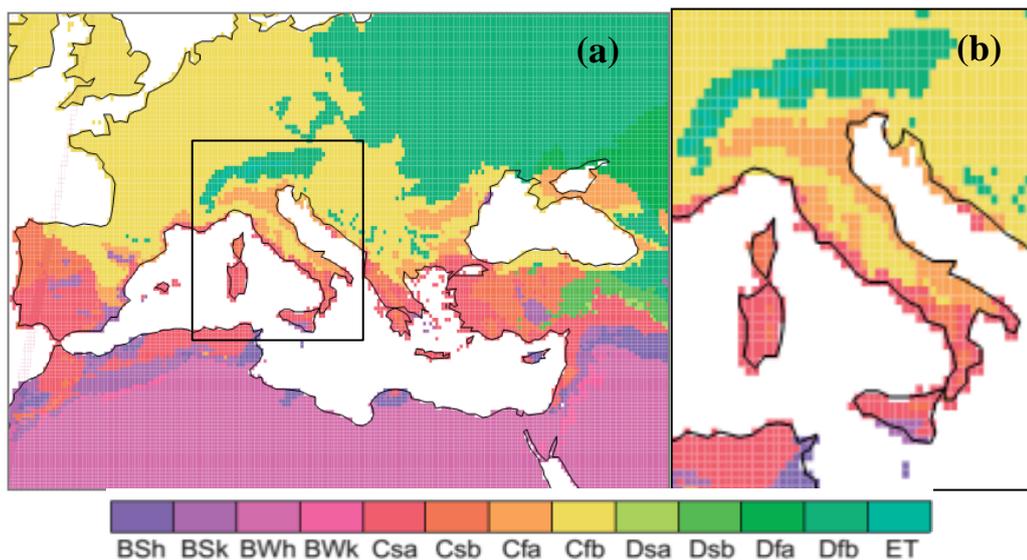


Figura 2-1 – Tipi climatici di Köppen in area Mediterranea. Bacino mediterraneo (a) e dettaglio della penisola Italiana (b). **BSh**: clima della steppa subtropicale, **BSk**: clima della steppa delle medie latitudini, **BWh**: clima desertico subtropicale, **BWk**: clima desertico delle medie latitudini, **Csa/Csb**: clima Mediterraneo con estate calda/tiepida, **Cfa**: clima temperato umido senza stagione secca, **Cfb**: clima temperato umido marittimo senza stagione secca, **Dfa/Dfb**: clima umido continentale con estate calda/tiepida, **Dsa/Dsb**: continentale con estate secca calda/tiepida, **ET**: clima della tundra (Lionello et al., 2012).

In ragione di queste particolarità di carattere geografico, l'area mediterranea è considerata come una delle zone più fragili e vulnerabili dal punto di vista climatico; anche piccoli mutamenti nella circolazione atmosferica che si verificano nelle regioni adiacenti possono, infatti, produrre variazioni climatiche significative (Giorgi and Lionello, 2008). Per questo motivo l'intera regione è ritenuta come una delle più sensibili ai cambiamenti climatici, in particolare per quanto riguarda i seguenti aspetti specifici:

- Molti studi confermano la tendenza in atto, prevedendo un probabile incremento generale delle temperature, in particolare per quanto riguarda il periodo estivo

per il quale le dinamiche future risultano essere più chiare (Lionello et al., 2012; Christensen et al., 2007; Kovats et al., 2014);

- Generale diminuzione delle precipitazioni, specialmente durante la stagione estiva, accompagnata, tuttavia da un aumento dell'intensità dei singoli eventi precipitativi, con un incremento del rischio di siccità (Lionello et al., 2012; Christensen et al., 2007; Kovats et al., 2014);
- Incremento della frequenza e dell'intensità degli eventi meteorologici estremi;
- Aumento della variabilità interannuale estiva (Giorgi and Lionello, 2008; Giorgi, 2006);
- Aumento della frequenza e della forza (in termini di durata e intensità) delle ondate di calore estive (Kuglitsch et al., 2010);
- Aumento dei rischi per la salute umana dovuti a episodi di stress termico da calore (Diffenbaugh et al., 2007).

Per quanto riguarda i cambiamenti climatici già in atto, è ormai riconosciuta la coerenza degli andamenti delle temperature registrati durante il XX secolo con le ipotesi di riscaldamento globale formulate dagli studiosi (Christensen et al., 2007) con particolare evidenza per la stagione estiva (Lionello et al., 2012). Ad esempio, il numero di giorni molto caldi (giorni la cui temperatura massima supera il 95° percentile della distribuzione delle temperature massime giornaliere sul periodo di riferimento) è aumentato in maniera significativa nell'intera area Mediterranea, mentre una tendenza opposta è stata rilevata per le notti molto fredde (notti la cui temperatura minima è inferiore al 5° percentile della distribuzione delle temperature minime giornaliere sul periodo di riferimento); in particolare, in Italia i giorni molto caldi sono cresciuti di 3 unità per decade (Lionello et al., 2012).

2.2 Selezione delle località climatiche di riferimento

Ai fini della valutazione delle prestazioni energetiche degli edifici, i comuni italiani sono classificati in 6 zone climatiche, individuate dal D.P.R. 412/93 sulla base del numero di gradi giorno¹⁰, secondo quanto riportato nella Tabella 2-1 e nella Figura 2-2 che mostra la distribuzione delle diverse zone climatiche sul territorio nazionale.

¹⁰ Per *gradi giorno* di una località si intende la somma estesa a tutti i giorni di un periodo annuale convenzionale di riscaldamento delle sole differenze positive giornaliere tra la temperatura dell'ambiente assunta pari a 20°C e la temperatura esterna media giornaliera (GG)

Tabella 2-1- Zone climatiche italiane ai sensi del D.P.R. 412/93

Zona Climatica	Gradi Giorno	Alcune località esemplificative
A	da 0 a 600	Lampedusa
B	da 601 a 900	Palermo, Catania, Messina
C	da 901 a 1400	Napoli, Bari, Cagliari, Catanzaro
D	da 1401 a 2100	Roma, Genova, Firenze, Pescara
E	da 2101 a 3000	Milano, Torino, Venezia, Bologna
F	oltre 3000	Bressanone, Tolmezzo, Courmayeur

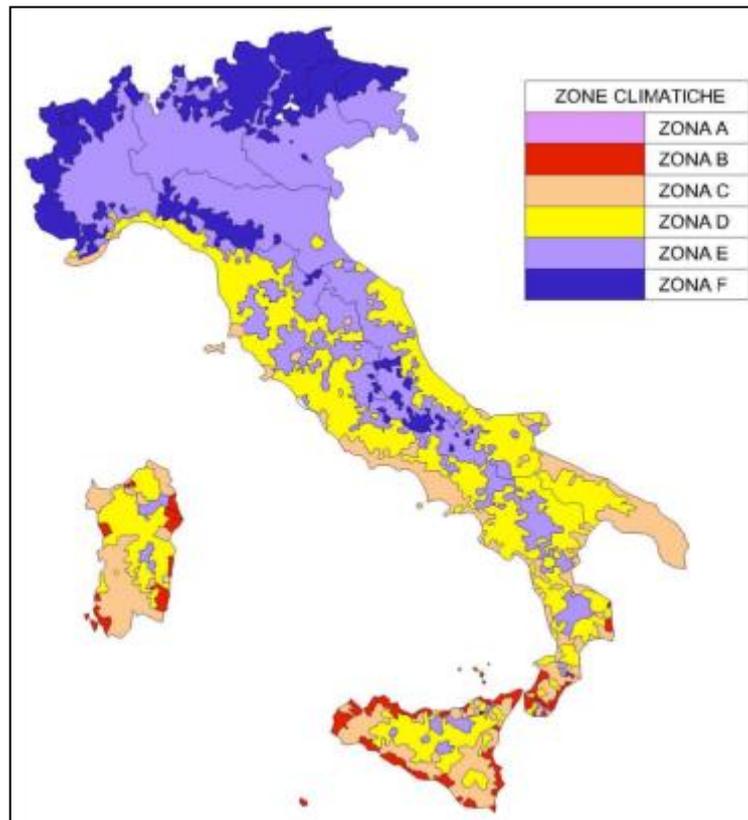


Figura 2-2 – Zonizzazione climatica dei comuni italiani ai sensi del D.P.R. 412/93

In base a tale classificazione sono definiti peraltro i periodi delle stagioni di riscaldamento: ad esempio la zona C va dal 15 novembre al 31 marzo, la D dal 1 novembre al 15 aprile e la zona E dal 15 ottobre al 15 aprile. Sulla base di tali periodi sono ufficialmente accesi e spenti gli impianti di riscaldamento, è determinato l'orario di accensione degli stessi e valutati i consumi energetici a scopo di certificazione.

Il progetto TABULA sulla base della suddetta classificazione, ha individuato 3 macro zone climatiche:

- **area climatica mediterranea-costiera**, composta dalle zone climatiche “A”, “B”, “C”, “D”.
- **area climatica media**, coincidente con le zone climatiche “E”;
- **area climatica alpina**, coincidente con la zona climatica “F”;

ed ha focalizzato l’analisi sul patrimonio edilizio dell’area climatica media e della regione Piemonte in particolare (Corrado et al., 2014). Coerentemente con l’obiettivo di estendere la metodologia d’indagine sviluppata nell’esperienza di TABULA a patrimoni edilizi rappresentativi di altre realtà territoriali collocate nell’area climatica mediterranea è stata effettuata una rielaborazione dei dati ISTAT relativi al 15° Censimento della popolazione e delle abitazioni 2011 (ISTAT, 2016) volta ad analizzare la distribuzione statistica assoluta (Tabella 2-2) e percentuale (Figura 2-3) del numero di comuni, del numero di abitanti e del numero di edifici residenziali per ciascuna zona climatica. Restringendo l’esame dei dati alle sole zone climatiche C, D ed E che raccolgono la maggior parte dei comuni (85%) e della popolazione italiana (92%), emerge come le zone C e D, se considerate insieme, eguagliano il numero di abitanti della zona E, ed hanno un numero di edifici residenziali leggermente superiore (45% contro 43%).

Tabella 2-2 – Distribuzione del numero di comuni, abitanti ed edifici residenziali per zona climatica

Zona Climatica	Numero di Comuni	Numero di abitanti (migliaia)	Numero di edifici residenziali (migliaia)
A	2	23.0	5.2
B	156	3171.8	694.9
C	984	12647.2	2688.5
D	1605	14971.0	2849.1
E	4276	27131.5	5234.7
F	1069	1626.2	715.3
Totale	8092	59570.6	12187.7

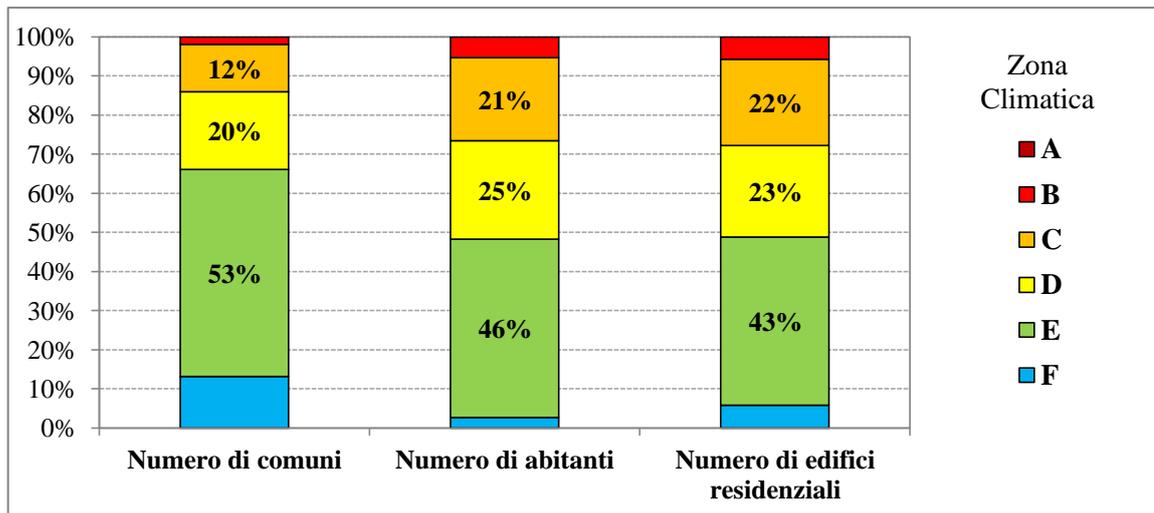


Figura 2-3 – Distribuzione percentuale del numero di comuni, abitanti ed edifici residenziali per zona climatica

A seguito di quest’analisi, si può pertanto affermare che le zone C e D siano altrettanto rilevanti in termini di numero di abitanti e di edifici residenziali rispetto alla zona climatica E. L’analisi energetica dei patrimoni edilizi ricadenti in tali zone e l’individuazione degli interventi di efficientamento applicabili può, pertanto, condurre a risultati applicabili su vasta scala che garantiscono un impatto rilevante in termini di riduzione delle emissioni climalteranti.

Al fine di selezionare, nel contesto geografico della Toscana, profili climatici esemplificativi delle zone C e D sono state individuate le due seguenti località:

- Firenze, collocata nell’entroterra Toscano a circa 80 km dalla costa lungo la valle del fiume Arno in corrispondenza dei rilievi preappenninici; con 1821 gradi giorno ricade in zona climatica D;
- San Vincenzo – Livorno, località costiera situata immediatamente a Nord del promontorio di Piombino che con 1051 gradi giorno ricade in zona climatica C.

Firenze (zona climatica D) costituisce la località di riferimento della ricerca ai fini dell’individuazione delle soluzioni di efficientamento energetico più “robuste” in rapporto agli obiettivi della ricerca. San Vincenzo (zona climatica C), località esemplificativa del clima più mite della toscana costiera (e in generale delle aree litoranee dell’Italia centrale), è impiegata nell’ultima fase della ricerca, per verificare la sensibilità delle soluzioni “robuste”, precedentemente individuate, alla variazione del contesto climatico. La disponibilità di profili climatici impiegabili nei codici di calcolo dinamici per la simulazione energetica degli edifici rende queste località idonee per

l'analisi oggetto della presente tesi. Queste possono inoltre considerarsi come esemplificative delle due principali realtà climatiche presenti in Toscana; ricadono, infatti, all'interno delle due fasce climatiche che, secondo la suddivisione proposta da Pinna (1978) e riportata in Figura 2-4 caratterizzano il territorio regionale; Firenze ricade nella zona "temperata sublitoranea" che caratterizza l'entroterra e che risulta influenzata dalla presenza dei rilievi collinari e montani; San Vincenzo nella zona "temperata calda" tipica della costa e fortemente influenzata dalla presenza mitigatrice del mare. Ampliando il contesto geografico di riferimento si può notare come entrambe queste zone climatiche siano tipiche dei climi regionali dell'Italia centrale e meridionale e appartengano alla più ampia categoria di clima temperato Mediterraneo (categoria Cs) come definita ed identificata nella suddetta classificazione di Köppen.

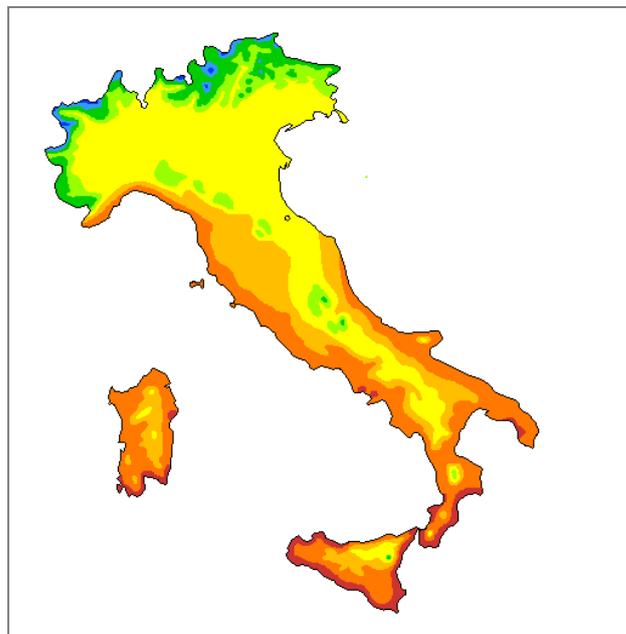


Figura 2-4 – Carta dei clima secondo Pinna (1978) ■ subtropicale, ■ temperato caldo, ■ sublitoraneo, ■ subcontinentale, ■ temperato fresco, ■ temperato freddo, ■ freddo, ■ glaciale (rielaborazione per Wikipedia, fonte: https://it.wikipedia.org/wiki/Clima_italiano)

Firenze, in particolare, presenta una delle stagioni estive più calde fra le città italiane, come confermato dai dati climatici relativi all'estate del 2015, ed una stagione invernale non particolarmente mite. In ragione di tali caratteristiche può essere considerata una località di studio appropriata per mettere in evidenza le eventuali criticità che potrebbero verificarsi nel comportamento energetico, sia estivo che invernale, degli edifici a seguito del previsto cambiamento climatico in una città a clima prevalentemente Mediterraneo. A supporto di quanto affermato si riporta come, nella

valutazione effettuata dalla commissione europea sulla vulnerabilità delle aree urbane ai cambiamenti climatici, la città di Firenze presenta valori critici rispetto ad alcuni degli indicatori considerati: in particolare, è collocata nella categoria più svantaggiata per quanto riguarda il discomfort termico notturno registrato nel periodo 2002-2012 (Timmerman, 2015) (European Climate Adaptation Platform, 2016)).

2.3 Profili climatici attuali delle località di riferimento

Ai fini della valutazione energetica degli edifici mediante codici di calcolo in regime dinamico è necessario definire le condizioni al contorno climatiche attuali che caratterizzano le due località oggetto di studio. Tale operazione è stata eseguita mediante il reperimento di archivi alfanumerici denominati *Test Reference Year* (TRY) o “anno tipo” che raccolgono i valori orari annuali delle principali variabili meteorologiche significative ai fini delle valutazioni energetiche ed ambientali. Gli anni tipo sono generati selezionando, secondo appropriate procedure statistiche, i dati che li compongono all’interno di una serie storica di dati effettivamente misurati sufficientemente estesa nel tempo. In particolare, per ogni mese del calendario e per ogni parametro climatico considerato, viene individuato il mese reale che risulta statisticamente più coerente con l’andamento climatico di lungo periodo. L’anno tipo risultante è quindi composto da mesi reali appartenenti ad anni diversi che vengono collegati fra loro mediante adeguate metodologie di calcolo (Mandurino, 2009). Entrambe i profili utilizzati nel presente lavoro sono stati generati in accordo con la metodologia indicata dalla norma UNI EN ISO 15927 (UNI Ente di Unificazione Italiano, 2005). In particolare le fonti degli anni tipo utilizzati sono le seguenti:

- Per Firenze, l’archivio elaborato dal Comitato Termotecnico Italiano (CTI - Comitato Termotecnico Italiano, 2016b) sulla base dei dati raccolti fra il 2000 e il 2009 dalla stazione “Firenze Città - 111” del Servizio Agrometeorologico della Regione Toscana (ARSIA);
- Per San Vincenzo, l’archivio ItMeteoData (ItMeteoData, 2016) sviluppato nell’ambito del Progetto ET-IDEA da NIER Ingegneria S.p.A. e dall’Università di Bologna, sulla base dei dati raccolti fra il 1990 e il 2009 dalla stazione “San Vincenzo - 035” del Servizio Agrometeorologico della Regione Toscana (ARSIA);

In riferimento alle due località di studio, nella Figura 2-5 e nella Figura 2-6 sono riportati i valori mensili dei principali parametri climatici per la valutazione energetica,

elaborati sulla base dei dati orari contenuti negli anni tipo suddetti. Nella Figura 2-7 è riportato il confronto fra i valori medi mensili della temperatura e dell'umidità relativa delle due località esaminate. Da queste si evince come il clima della fascia costiera, pur presentando valori medi di temperatura simili a quelli del clima sublitoraneo, presenti minori escursioni sia a livello stagionale che, soprattutto, giornaliero. Esso risulta, inoltre, nettamente più umido del clima interno, sia nei valori medi che nei valori massimi e minimi.

E' necessario precisare come il confronto fra i due profili climatici possa essere fatto solo tenendo in adeguata considerazione i seguenti aspetti:

- Le serie storiche di partenza hanno estensione diversa e si sovrappongono solo nel periodo 2000-2009. In particolare, il file climatico di Firenze è stato generato impiegando dati climatici molto recenti che potrebbero essere influenzati dai cambiamenti climatici già in atto.
- i due profili climatici sono frutto di elaborazioni, che pur impiegando la medesima metodologia di base (UNI EN ISO 15927-4), sono state effettuate nel contesto di differenti progetti di ricerca e che pertanto potrebbero essere caratterizzate da procedure di calcolo non del tutto omogenee¹¹;

¹¹ Nel caso di San Vincenzo, il dato sulla radiazione diffusa mensile, non presente nel file originale, è stato elaborato a partire dalla radiazione globale mensile, secondo il metodo indicato nella norma UNI EN ISO 15927-1(UNI - Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 2004).

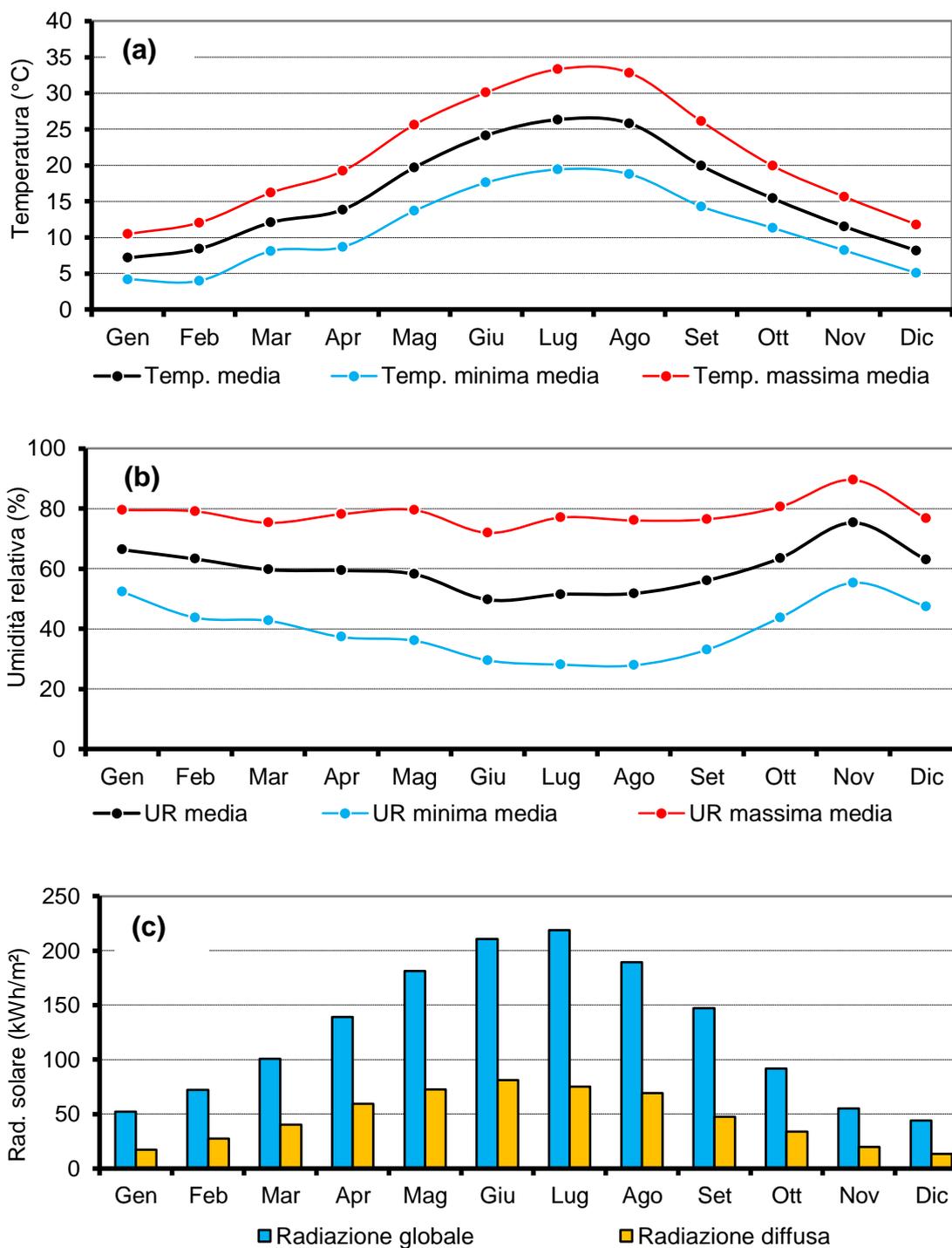


Figura 2-5 – Valori mensili di temperatura media(a), umidità relativa media(b) e radiazione solare sul piano orizzontale (c) per la località di Firenze. Elaborazione sulla base del file climatico CTI

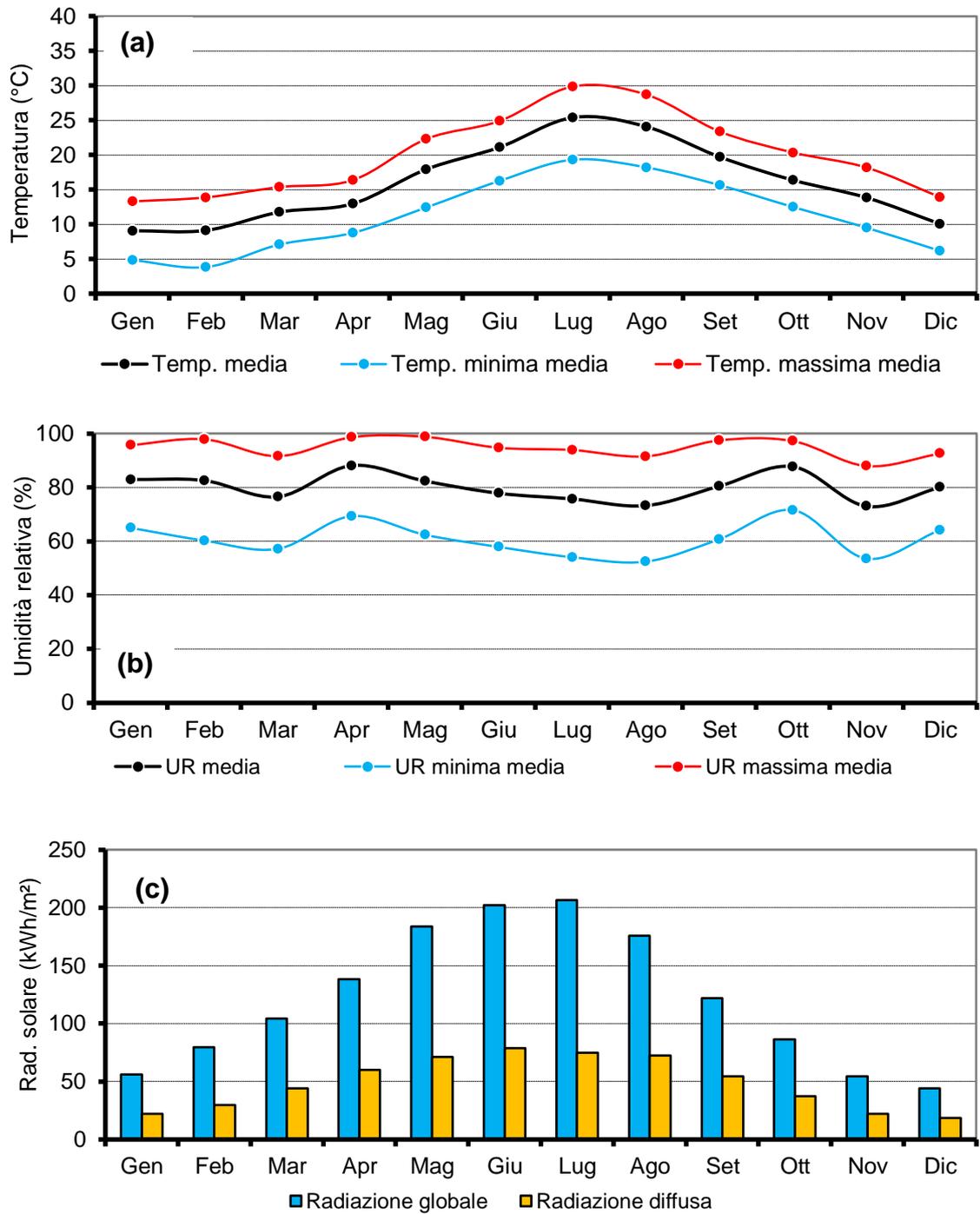


Figura 2-6 - Valori mensili di temperatura media (a), umidità relativa media (b) e radiazione solare sul piano orizzontale (c) per la località di San Vincenzo (Livorno). Elaborazione sulla base del file climatico ItMeteoData

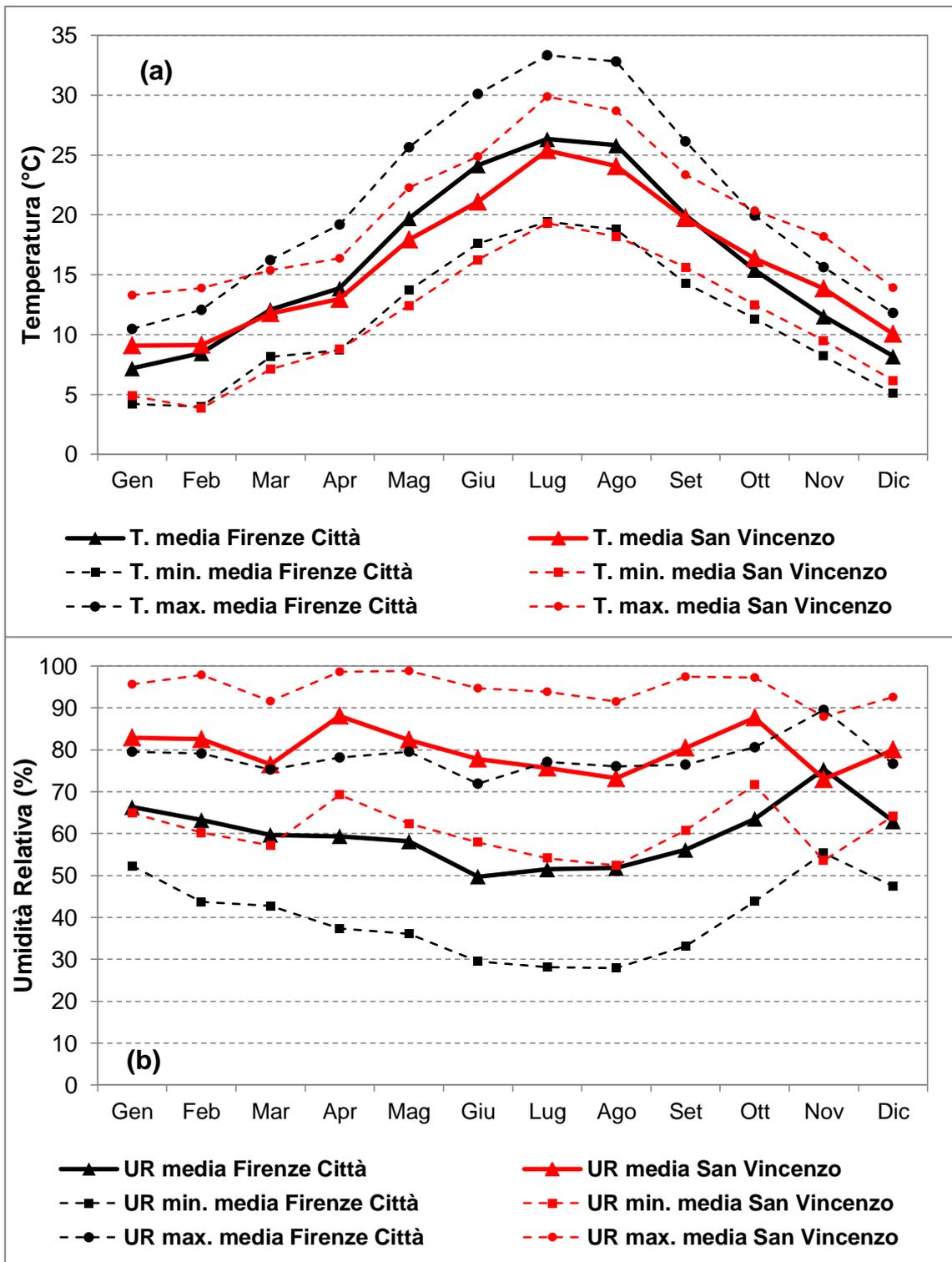


Figura 2-7 – Confronto fra valori medi mensili, minimi e massimi, di temperatura (a) e Umidità Relativa (b) elaborati sulla base degli anni tipo climatici di Firenze Città e San Vincenzo

2.3.1 Considerazioni sull'effetto isola di calore urbana

Il clima delle aree urbane presenta può presentare temperature più elevate a causa di diversi fattori, come ad esempio la minor perdita di calore per effetto radiante durante la notte e il minor scambio convettivo determinato da velocità del vento più basse; nel complesso queste ed altre condizioni danno luogo ad uno specifico fenomeno che contraddistingue il clima urbano noto come isola di calore urbana. Questo effetto è generalmente caratterizzato da una correlazione positiva tra la temperatura e il numero di abitanti e la densità edilizia di una città (WHO, 2003). Va inoltre considerato che, nel prossimo futuro, le aree urbane ospiteranno circa il 60% della popolazione globale (Douglas, 1992; UNFPA, 1999) con un tasso di urbanizzazione senza precedenti in tutta la storia del genere umano. Il sito web europeo sull'Adattamento ai Cambiamenti Climatici mostra che il numero medio di giorni caldi combinati con notti tropicali raggiunge livelli sensibili nelle città dell'Europa meridionale dove questo effetto è ulteriormente intensificato a causa dell' isola di calore urbana. In particolare la città di Firenze è classificata nella categoria più critica per quanto riguarda il numero annuo di notti di disagio termico, con un valore pari a 61,4 notti nel il periodo 2002-2012 (European Climate Adaptation Platform, 2016).

Come anticipato nell'introduzione la scelta di un profilo climatico elaborato sulla base di serie storiche di dati meteo rilevati in pieno centro urbano di Firenze e quindi certamente influenzati dal cosiddetto effetto dell'isola di calore urbana, è coerente con l'impostazione metodologica della ricerca che prevede di valutare le strategie di riqualificazione energetiche più robuste rispetto agli scenari climatici futuri, considerando condizioni al contorno critiche che permettano di evidenziare le problematiche conseguenti a determinati approcci progettuali. Seguendo questo criterio e sulla base di precedenti studi in merito (Berger et al., 2014) si è scelto di utilizzare un file climatico di base (Firenze) che incorporando l'effetto dell'isola di calore urbana amplifichi ulteriormente gli effetti del cambiamento climatico. Per quantificare in maniera preliminare i possibili effetti dell' isola di calore urbana sulle rilevazioni utilizzate come base per l'elaborazione del file climatico di Firenze impiegato nella presente ricerca i dati giornalieri di temperatura relativi al periodo 2001-2010 della stazione "Firenze Città" (Servizio Agrometeorologico Regione Toscana, 2015) sono stati confrontati con quelli rilevati nella stazione meteorologica dell'Aeronautica Militare presso l'aeroporto Firenze Peretola (cod. WMO 161700) collocato all'estrema

periferia Nord-Est della città (ISPRA - Istituto superiore per la protezione e la ricerca ambientale, 2015). In Figura 2-8 è riportata la collocazione delle due stazioni metereologiche.

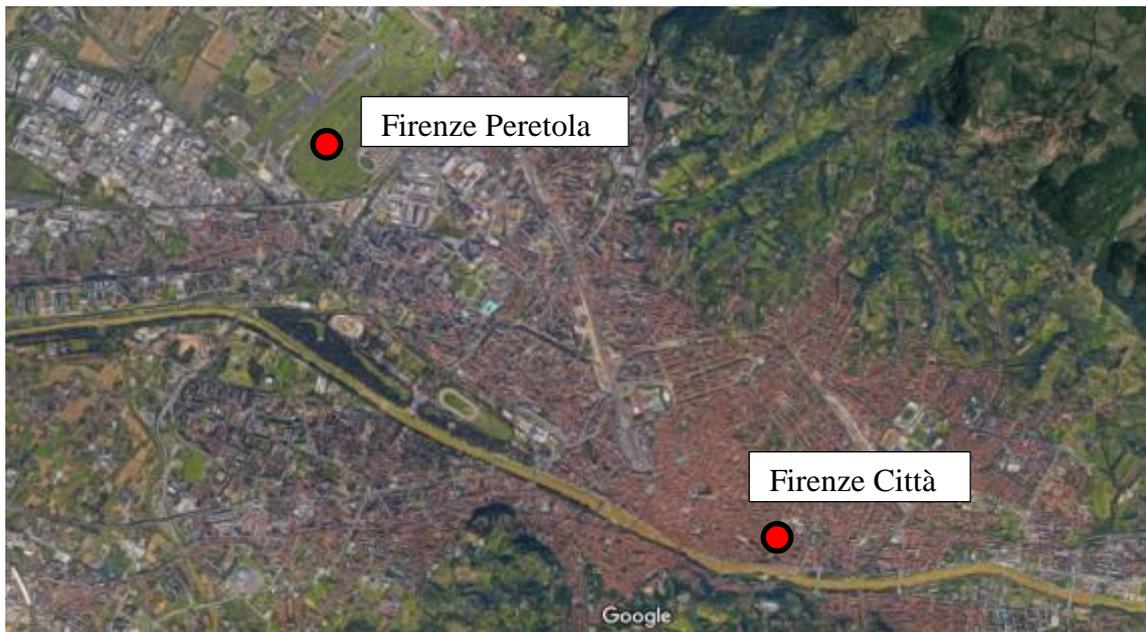


Figura 2-8 – Posizionamento delle due stazioni metereologiche di “Firenze Peretola” e “Firenze Città”

Analizzando le temperature medie stagionali riportate in Figura 2-9, la stazione di “Firenze Città” risulta più calda di “Firenze Peretola” in tutte le stagioni. Le maggiori differenze fra le due stazioni si registrano nella stagione invernale, anche a causa dell'accensione degli impianti di riscaldamento che amplifica l'effetto di isola di calore urbana, mentre le differenze più contenute si registrano in autunno ed estate. Le temperature medie risultano maggiori di un valore compreso fra 0°C in autunno e $0,7^{\circ}\text{C}$ in inverno. Le temperature massime di un valore compreso fra $0,4^{\circ}\text{C}$ in autunno e $0,8^{\circ}\text{C}$ in primavera. Le minime, che presentano le maggiori differenze, di un valore compreso fra $0,3^{\circ}\text{C}$ in estate e $1,5^{\circ}\text{C}$ in inverno.

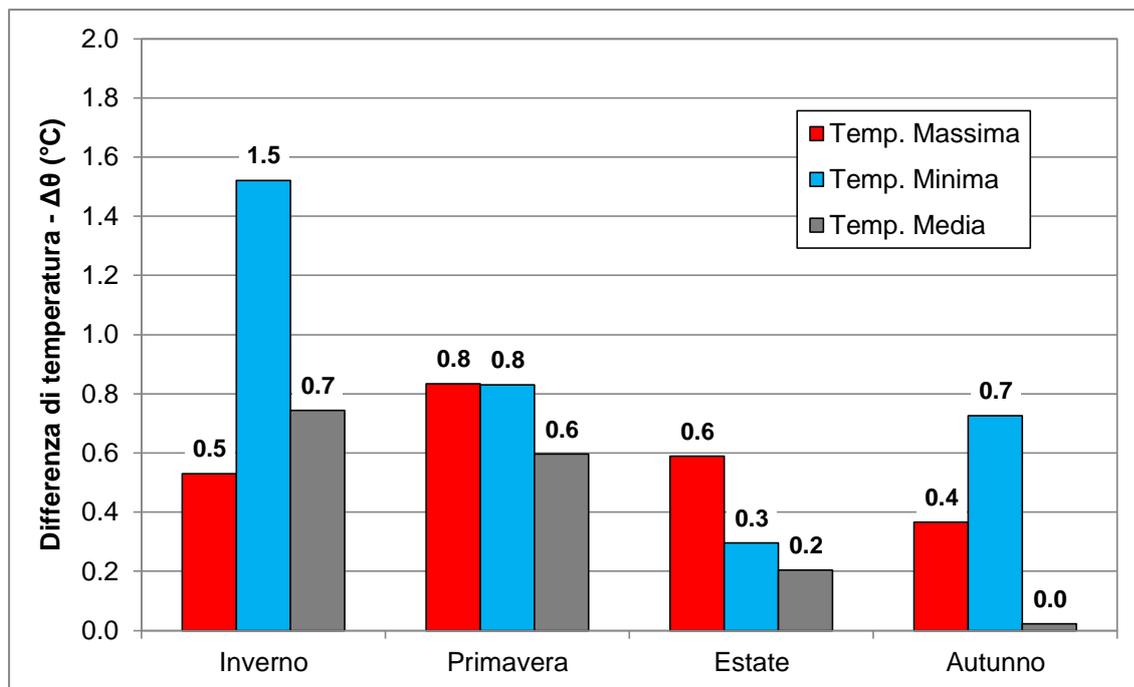


Figura 2-9 – Differenza nelle temperature medie stagionali (medie massime e minime) fra la stazione meteorologica di “Firenze città” e quella di “Firenze Peretola”

2.4 Generazione dei file climatici futuri

Per ciascuna delle due località di riferimento sono stati generati gli anni tipo climatici rappresentativi della realtà climatica che si prevede possa determinarsi in futuro a seguito degli effetti del riscaldamento globale. In particolare sono state considerati due periodi di riferimento:

- 2036-65 (medio termine)
- 2066-95 (lungo termine)

e due dei quattro scenari di concentrazione delle emissioni climalteranti *Representative Concentration Pathways* (RPC) elaborati nel 5° Rapporto di Valutazione dell’ Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC AR5) (Cubasch et al., 2013):

- RPC 4.5, emissioni climalteranti (in termini di CO₂ equivalente) moderate con un picco intorno al 2040 ed una successiva diminuzione e stabilizzazione (vedi Figura 2-10);
- RPC 8.5, emissioni climalteranti (in termini di CO₂ equivalente) elevate in crescita durante tutto il 22° secolo (vedi Figura 2-10).

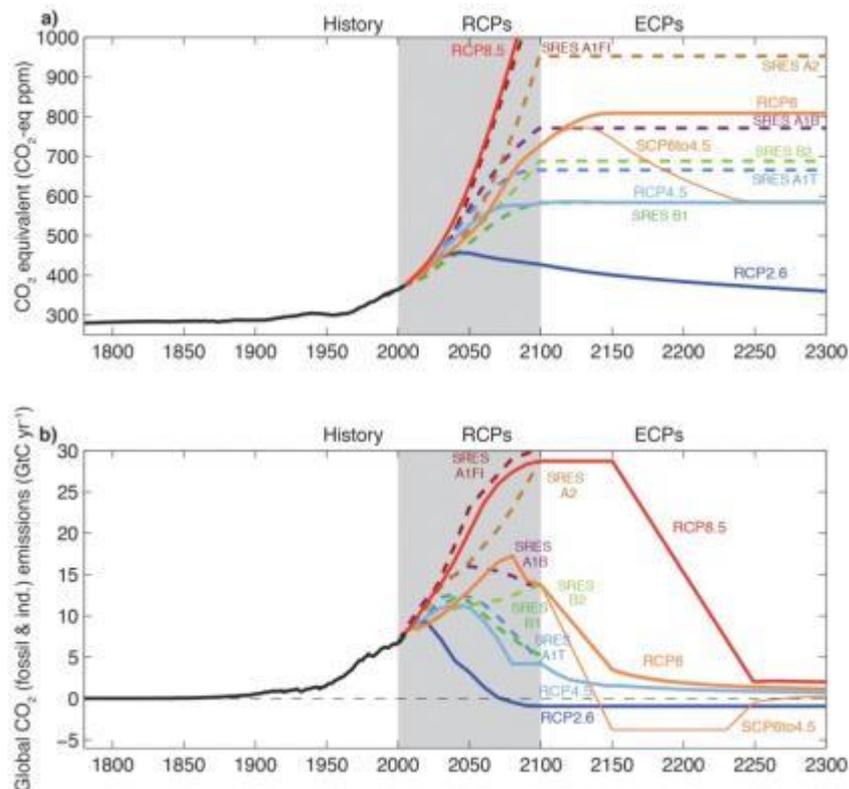


Figura 2-10 - Concentrazione di CO₂ equivalente (a) ed emissioni di CO₂ (b) per i quattro scenari RCP considerati nel 5° Rapporto IPCC.

Le elaborazioni degli anni tipo futuri sono state fatte in via sperimentale mediante gli algoritmi di *morphing* messa a punto da Belcher et al. (2005). Questa procedura prevede di modificare i valori orari dei parametri climatici dell'anno tipo attuale sulla base delle differenze medie mensili presente-futuro elaborate mediante appositi modelli di simulazione climatica. La tecnica del *morphing* prevede l'utilizzo a livello mensile di tre algoritmi di base da impiegare in funzione del parametro climatico da trasformare:

- La traslazione verticale del profilo orario (*shift*) mediante la formula

$$x = x_0 + \Delta x_m$$

dove x e x_0 sono il valore orario futuro e attuale della variabile climatica e Δx_m è il valore della differenza fra valore medio futuro e valore medio attuale. Questa formula è impiegata ad esempio per la trasformazione dei profili di pressione atmosferica;

- La variazione di ampiezza del profilo orario (*stretch*) mediante la formula

$$x = \alpha_m \cdot x_0$$

dove α_m rappresenta l'incremento percentuale del valore medio mensile futuro rispetto al valore medio mensile presente;

- La combinazione dei due precedenti effetti (*shift and stretch*) mediante la formula

$$x = x_0 + \Delta x_m + \alpha_m(x_0 - \langle x_0 \rangle_m)$$

dove $\langle x_0 \rangle_m$ rappresenta la media mensile presente della variabile considerata e α_m rappresenta il rapporto fra la variazione assoluta media mensile futuro-presente e l'intervallo dei valori medi mensili attuali.

L'algoritmo *shift* è utilizzato nel caso di variabili climatiche, quale la pressione atmosferica, per le quali le proiezioni climatiche forniscono un variazione in termini assoluti della media mensile; in questo caso la varianza del profilo attuale non viene alterata. l'algoritmo *stretch* è impiegato per quelle variabili la cui proiezione futura è data in termini di variazione percentuale del valore medio; è il caso della velocità del vento, della quantità di pioggia o, ad esempio, di parametri che, come la radiazione solare, assumono valori nulli nel corso della giornata. La combinazione dei due algoritmi viene usata per quelle variabili di cui i modelli climatici forniscono i cambiamenti relativi sia al valore medio che alla varianza della serie temporale. E' il caso della temperatura a bulbo secco per cui vengono simulati i cambiamenti relativi sia alla media giornaliera che ai valori massimi e minimi attraverso la formula

$$\alpha_m = \frac{\Delta TMAX_m - \Delta TMIN_m}{\langle dbt_{0\ max} \rangle_m - \langle dbt_{0\ min} \rangle_m}$$

dove $\Delta TMAX_m$ e $\Delta TMIN_m$ rappresentano la variazione assoluta del valore medio mensile della temperatura massima e minima giornaliera e $\langle dbt_{0\ max} \rangle_m$ e $\langle dbt_{0\ min} \rangle_m$ rappresentano il valore medio mensile attuale della temperatura massima e minima giornaliera.

I valori di Δx_m e α_m per la temperatura a bulbo secco sono stati elaborati con cadenza mensile a partire dall'output delle simulazioni climatiche effettuate dal Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti Climatici (CMCC), mediante il modello climatico regionale (RCM) COSMO CLM (CMCC, 2016) impiegando una griglia di analisi con risoluzione orizzontale elevata (circa 0.0715° pari a 8 km) che permette di descrivere

l'orografia dell'area geografica analizzata in modo molto più dettagliato rispetto ai modelli climatici globali (CCM). Tale caratteristica rende i dati di base sui quali sono stati costruiti i file climatici adeguati per lo studio degli impatti dei cambiamenti climatici su un territorio morfologicamente complesso come la penisola italiana (Bucchignani et al., 2016). I parametri climatici, per i quali allo stato attuale le simulazioni del CMCC non forniscono previsioni (radiazione solare, umidità relativa e velocità del vento) sono stati lasciati invariati rispetto ai valori attuali (Guan, 2009). Sono attualmente in fase di studio strumenti e metodi per la stima indiretta di questi parametri.

Il metodo del *morphing* è stato impiegato nella presente ricerca in ragione dei numerosi vantaggi pratici che offre rispetto ad altre tecniche di generazione di profili climatici futuri per le simulazioni energetiche quali l'interpolazione, la generazione stocastica e il *downscaling* dinamico (Belcher et al., 2005; Guan, 2009; Jentsch et al., 2008). Questa procedura permette infatti di produrre serie temporali che includono i mutamenti previsti dagli scenari climatici futuri preservando la coerenza meteorologica e l'affidabilità dei profili climatici attuali, generati, con metodologie di elaborazione condivise, sulla base di osservazioni reali. In questo senso il metodo risulta efficace nel "ridurre" le previsioni dei modelli climatici alla risoluzione spaziale e temporale necessaria per le simulazioni energetica dinamica. Inoltre, gli studi condotti da Belcher (2005) confrontando indicatori climatici sintetici di diverse località del Regno Unito ottenuti da *morphing*, con gli analoghi derivanti direttamente dai modelli climatici ad alta risoluzione, mostrano un elevato grado di coerenza e fedeltà. Una possibile limitazione è dovuta al fatto che i dati futuri così ottenuti ereditano la variabilità di base dal clima attuale non tenendo conto della diversa variabilità intrannuale che potrebbe caratterizzare il clima futuro.

La creazione di file climatici rappresentativi delle condizioni future previste per il territorio italiano rappresenta un contributo originale del presente lavoro. La metodologia di generazione adottata, infatti, pur essendo basata su algoritmi e procedure sviluppate e validate da altri ricercatori si distingue per l'impiego di dati derivanti da proiezioni climatiche dettagliate e di recentissima emissione, appositamente sviluppate per tenere conto delle complesse caratteristiche geo-climatiche del bacino Mediterraneo e della penisola Italiana. Tale procedura, una volta perfezionata ed estesa a tutte le località italiane per le quali è disponibile un file climatico attuale, permetterebbe la

creazione di un archivio di file climatici futuri basati su modelli dettagliati, utilizzabili da ricercatori, legislatori e pianificatori, analogamente a quanto sviluppato da Jentsch et al. (2013) in Gran Bretagna.

Nella Figura 2-11 e nella Figura 2-12 sono riportati gli andamenti attuali e futuri dei valori medi mensili della temperatura a bulbo secco elaborati ai fini della presente ricerca per le due località di studio in rapporto agli orizzonti temporali e agli scenari emissivi di riferimento.

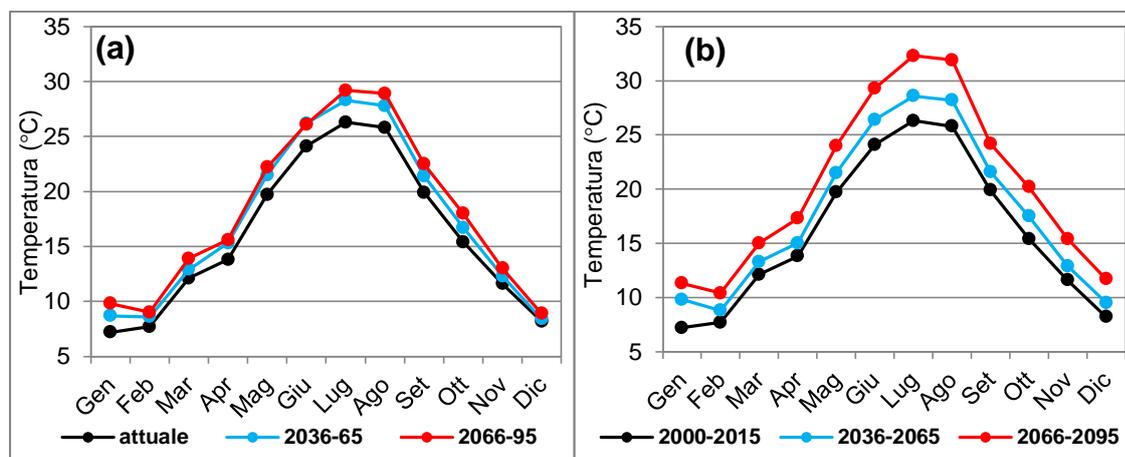


Figura 2-11 Valori medi mensili della temperatura a bulbo secco sulla base dei file climatici attuali e futuri di Firenze con scenario RCP 4,5 (a) e RCP 8,5 (b)

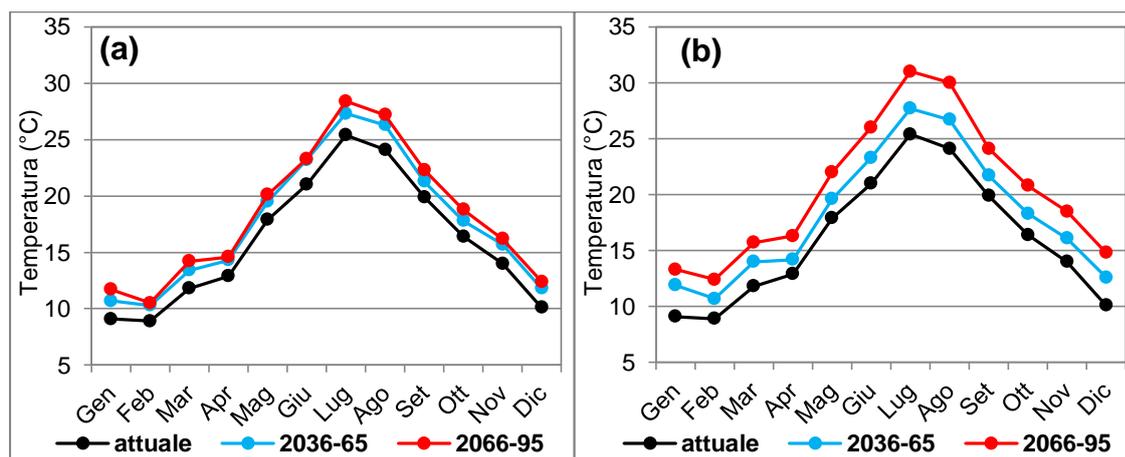


Figura 2-12 - Valori medi mensili della temperatura a bulbo secco sulla base dei file climatici attuali e futuri di San Vincenzo (Livorno) con scenario RCP 4,5 (a) e RCP 8,5 (b)

L'andamento delle temperature medie invernali dei due periodi futuri per Firenze presenta valori inferiori in Febbraio rispetto a Gennaio, inversamente a quanto accade nel profilo climatico attuale. Ciò è dovuto alle specifiche proiezioni del modello climatico regionale COSMO CLM in cui le temperature simulate relative a Febbraio risultano particolarmente basse.

Nelle Tabelle 2-3 e 2-4 sono riportati gli scostamenti massimi ($\Delta\theta_{mm,max}$) e minimi ($\Delta\theta_{mm,min}$) fra temperature medie mensili presenti e future per Firenze e San Vincenzo.

Tabella 2-3 – Scostamenti di temperatura media mensile fra file climatici attuali e futuri. Firenze.

orizzonte temporale	scenario	$\Delta\theta_{mm,min}$ (°C)	$\Delta\theta_{mm,max}$ (°C)
2036-65	RCP 4.5	0,8 (Marzo)	2,1 (Giugno)
	RCP 8.5	1,1 (Febbraio)	2,4 (Agosto)
2066-95	RCP 4.5	1,3 (Febbraio)	2,9 (Luglio)
	RCP 8.5	2,7 (Febbraio)	6,1 (Agosto)

Tabella 2-4 – Scostamenti di temperatura media mensile fra file climatici attuali e futuri. San Vincenzo.

orizzonte temporale	scenario	$\Delta\theta_{m,min}$ (°C)	$\Delta\theta_{m,max}$ (°C)
2036-65	RCP 4.5	1,4 (Febbraio)	2,2 (Giugno)
	RCP 8.5	1,3 (Aprile)	2,6 (Agosto)
2066-95	RCP 4.5	1,6 (Febbraio)	3,1 (Luglio)
	RCP 8.5	3,4 (Aprile)	5,9 (Agosto)

Dall'analisi dei dati risulta evidente come gli scostamenti maggiori si registrino nei mesi estivi e le differenze minori nei mesi invernali e primaverili. Ciò risulta coerente con le previsioni climatologiche che indicano, per l'area climatica Mediterranea un inasprimento delle condizioni estive che saranno caratterizzate da temperature medie crescenti e da ondate di calore di frequenza e intensità crescente.

Per caratterizzare mediante un indicatore sintetico la severità climatica degli anni climatici tipo attuali e futuri, nelle Tabelle 2-5 e 2-6 sono riportate le differenze di temperatura giornaliera cumulate invernali ed estive calcolate considerando rispettivamente una temperatura base (θ_b) di 20°C e 23°C (UNI Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 2008) (Riva et al., 2012).

Tabella 2-5 – Differenze di temperatura giornaliera cumulate invernali ed e estivi di Firenze calcolati sulla base degli anni tipo generati

orizzonte temporale	scenario	$\theta_{\Sigma d}(20^{\circ}\text{C})$ invernale (Kd)	$\theta_{\Sigma d}(23^{\circ}\text{C})$ estivo (Kd)
attuale		2037	277
2036-65	RCP 4.5	1787	474
	RCP 8.5	1668	499
2066-95	RCP 4.5	1629	559
	RCP 8.5	1240	896

Tabella 2-6 – Differenze di temperatura giornaliera cumulate invernali ed e estivi di San Vincenzo calcolati sulla base degli anni tipo generati

orizzonte temporale	scenario	$\theta_{\Sigma d}(20^{\circ}\text{C})$ invernale (Kd)	$\theta_{\Sigma d}(23^{\circ}\text{C})$ estivo (Kd)
attuale		1831	118
2036-65	RCP 4.5	1443	268
	RCP 8.5	1319	301
2066-95	RCP 4.5	1295	346
	RCP 8.5	904	621

I dati riportati indicano, seppur in modo indiretto, come in conseguenza delle previste variazioni climatiche le specifiche incidenze dei fabbisogni di riscaldamento e raffrescamento sul consumo totale annuo dei patrimoni edilizi muteranno radicalmente ed in particolare si può notare come, considerando l'orizzonte temporale di lungo termine e lo scenario di concentrazione di gas serra pessimistico (RCP 8.5), il peso dei consumi energetici estivi potrà assumere un'importanza analoga a quella dei consumi energetici invernali. In considerazione delle caratteristiche dei dati climatici elaborati, ai fini delle successive valutazioni del comportamento energetico futuro degli edifici oggetto di studio si farà riferimento allo scenario pessimistico (RCP 8.5). La scelta di analizzare la risposta degli edifici a scenari climatici estremi è determinata dalla necessità di forzare i risultati dello studio al fine di evidenziare eventuali criticità delle azioni di riqualificazione energetica ed impiantistica proposte.

3 Strumenti e metodi della ricerca

Nella Figura 3-1 è riportato un diagramma di flusso riassuntivo della metodologia adottata. Nei successivi paragrafi gli argomenti del diagramma saranno oggetto di sviluppo e approfondimento. Saranno in particolare esplicitate le ipotesi e le condizioni al contorno dell'analisi energetica ed economica.

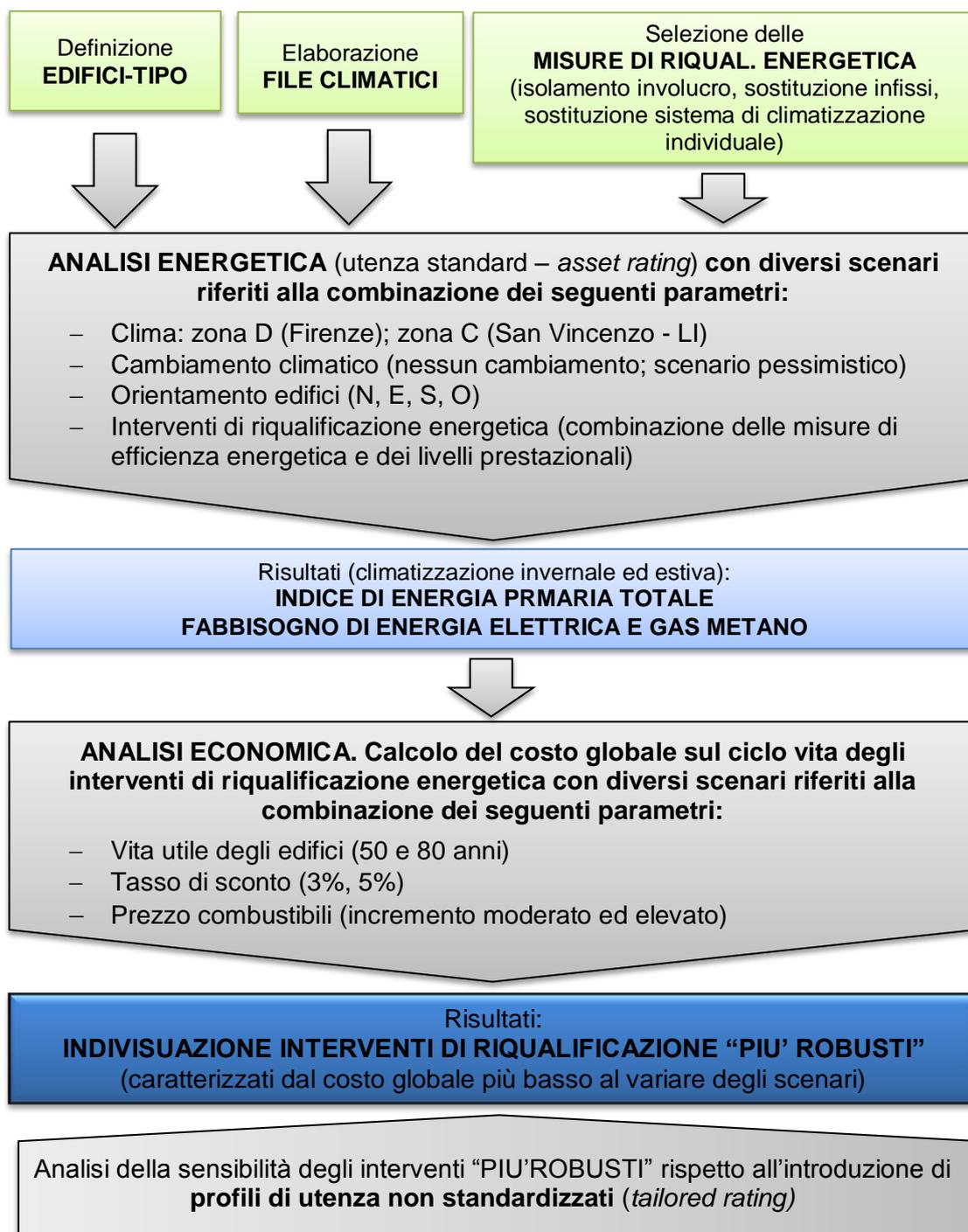


Figura 3-1 – Diagramma di flusso schematico riassuntivo del metodo della ricerca

3.1 Analisi energetica

3.1.1 Strumenti

Lo strumento impiegato per l'analisi energetica è il software Design Builder versione 3.4.0.041 (Design Builder Software Ltd, 2016) interfaccia grafica del codice di calcolo in regime dinamico Energy Plus versione 8.1 (Energy Plus, 2016), che permette l'analisi su base oraria del comportamento energetico dei sistemi edificio-impianto-utenza-clima. EnergyPlus è un codice di calcolo sviluppato a partire a cavallo fra gli anni '90 e 2000 dalla collaborazione del Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) con il Construction Engineering Laboratory (CERL) dell'esercito statunitense e l'Università dell'Illinois su finanziamento del Dipartimento dell'Energia degli Stati Uniti d'America. Energy Plus è stato sviluppato sulla base dei programmi predecessori DOE-2 e Blast sviluppati e rilasciati tra la fine degli anni '70 e gli inizi degli anni '80 e ancor largamente utilizzati fino a pochi anni fa dalla comunità scientifica internazionale (Crawley et al., 2000).

Il software Design Builder è validato nelle versioni 3.1 con Energy Plus 7.1 e 4.5 con Energy Plus 8.3 in conformità con le normative europee di riferimento UNI EN 15265 e UNI EN ISO 13790 (DesignBuilder Software Ltd, 2015, 2011). Le versioni 3.4 e 4.2, entrambi con Energy Plus 8.1 (la versione utilizzata nella presente ricerca) sono state validate anche in riferimento allo standard nordamericano ASHRAE 140-2011 (DesignBuilder Software Ltd, 2014a, 2014b). Il codice di calcolo Energy Plus è stato inoltre confrontato con altri modelli di simulazione energetica dalla diffusione e dalla reputazione consolidata (Zhu et al., 2013) e il suo modulo per il calcolo dei flussi di ventilazione naturale (*Airflow Network Module*) presenta risultati conformi alla soluzione analitica e allineati con quelli di altri modelli di calcolo (Zhai et al., 2011).

Il software in uso è stato comunque testato anche nel corso della presente ricerca in base alla citata norma UNI EN 15265 ottenendo risultati in parte discordanti rispetto alla certificazione ufficiale, e riportati in Tabella 3-1. A seguito di approfondimento le discordanze sono state attribuite in parte ai coefficienti convettivi utilizzati per la simulazione dello scambio termico attraverso i componenti opachi dell'involucro, ed in parte alla procedura di elaborazione del file climatico riportato nella norma rispetto a quello impiegato nella simulazione (loc. Trappes, France - 49°N, 2°E). Ciò ha consentito di tarare nel modo corretto i valori dei suddetti coefficienti convettivi ai fini delle simulazioni descritte in seguito.

Tabella 3-1 - Risultati del test di validazione ai sensi della norma UNI EN 15265

Tipo di test	$Q_{H,ref}$ (1)	$Q_{C,ref}$ (1)	Q_H (2)	Q_C (2)	rQ_H (3)	rQ_C (3)	$Q_{H,DB}$ (4)	$Q_{C,DB}$ (4)	$rQ_{H,DB}$ (5)	$rQ_{C,DB}$ (5)
Test 1	748,00	233,80	633	185	B	A				
Test 2	722,70	200,50	642,7	191,5	B	A				
Test 3	1368,50	43,00	1260,9	12,2	B	A				
Test 4	567,40	1530,90	707	916,3	B	NC				
Test 5	463,10	201,70	522,8	177,7	B	A	516,1	182,5	B	A
Test 6	509,80	185,10	520,4	184,3	A	A	533,1	173,6	A	A
Test 7	1067,40	19,50	1144,1	6,3	B	A	1117,5	14,5	A	A
Test 8	313,20	1133,20	547,7	809,7	NC	NC	385,4	922,1	A	C
Test 9	747,10	158,30	815,1	164,8	B	A	885	159,7	NC	A
Test 10	574,20	192,40	592,5	192,2	A	A	881,4	166	NC	A
Test 11	1395,10	14,10	1460,6	10,6	A	A	1513,2	14,7	B	A
Test 12	533,50	928,30	771,3	673,9	C	C	680,8	815,4	B	B
(1) Valori di riferimento della norma per riscaldamento e raffrescamento (2) Valori calcolati per riscaldamento e raffrescamento (3) classificazione ottenuta ai sensi della UNI EN 15265 per riscaldamento e raffrescamento (4) valori del test di Design Builder (5) classificazione Design Builder										

Energy Plus è caratterizzato dalla struttura a moduli illustrata nella Figura 3-2 e la sua peculiarità è la simulazione integrata (*Integrated Solution Manager*) dei carichi termici delle zone termiche (*air and surface heat balance*) e della risposta dei sistemi di distribuzione idronica e aeraulica e dei sistemi di generazione (*building systems simulation*).

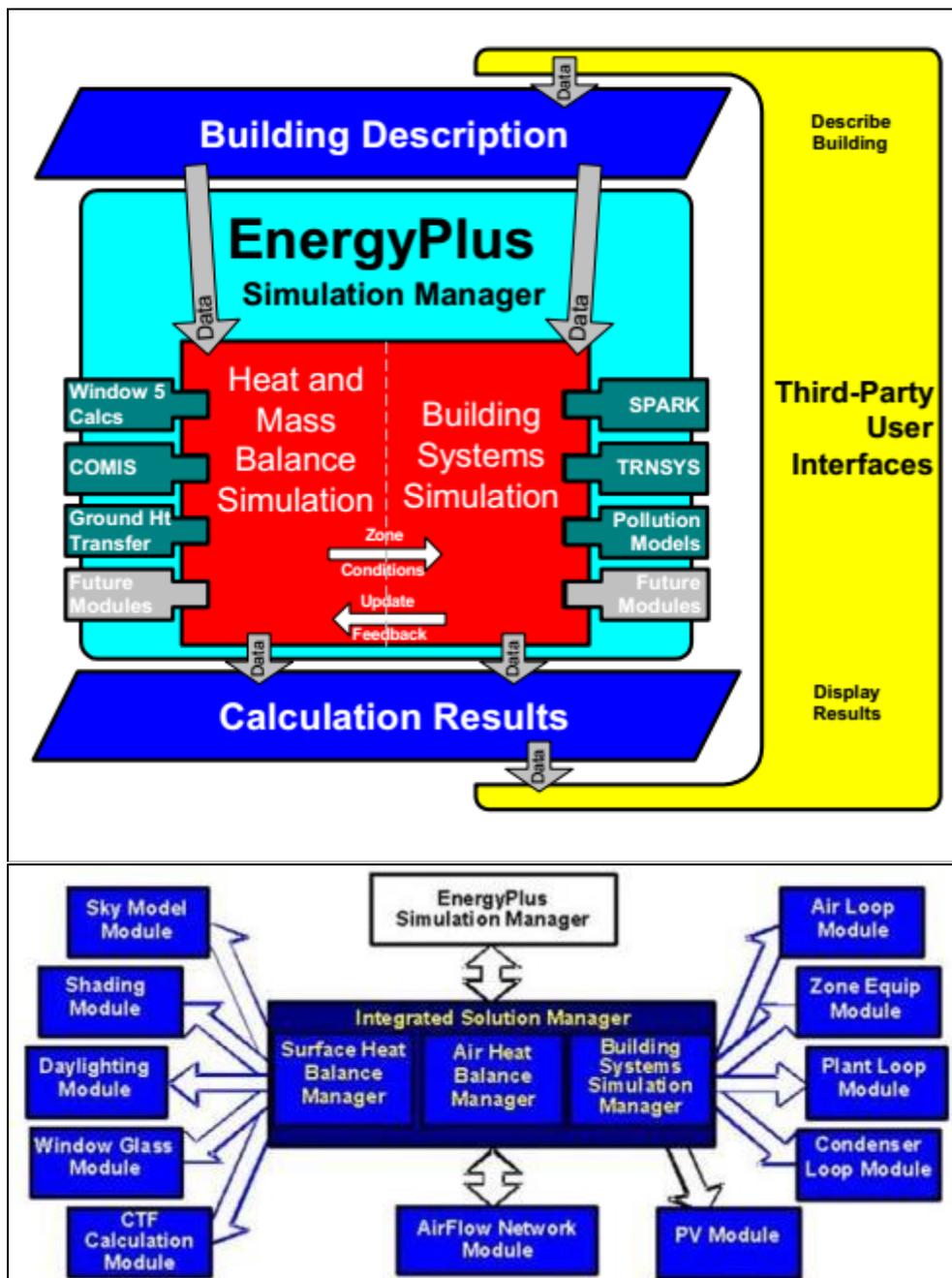


Figura 3-2 – Struttura di funzionamento di Energy Plus (Energy Plus, 2013)

In Energy Plus, , gli elementi del modello sono integrati e controllati simultaneamente mediante un modello di risoluzione che si basa sulla simulazione iterativa dei sistemi edificio e impianto finalizzata alla convergenza dei flussi termici richiesti dalla zona e dei quelli prodotti/emessi dai subsistemi impiantistici (Crawley et al., 2004).

La risoluzione integrata dei bilanci termici di zona e della risposta dei sistemi impiantistici avviene con risoluzione temporale sub-oraria. Questo permette la

simulazione accurata di fenomeni dinamici (variabili nel tempo) sia nell'interazione clima esterno-zona termica che nell'interazione zona termica-impianto. Ciò è particolarmente importante in contesti climatici mediterranei caratterizzati da una elevata variabilità dei parametri meteorologici anche all'interno della stessa giornata (Crawley et al., 2004).

Per quanto riguarda l'involucro i metodi di soluzione impiegati da Energy Plus per calcolare la conduzione del calore sono il metodo di soluzione con le Funzioni di Trasferimento (*Conduction Transfer Function – CTF*) e il metodo di soluzione alle Differenze Finite (*Conduction Finite Difference*). Entrambi i metodi sono in grado di simulare gli effetti di inerzia nella trasmissione del calore dovuti al contributo in termini di accumulo termico nella massa dell'edificio. Questa caratteristica consente di valutare la prestazione termica degli edifici tenendo conto della loro capacità termica così come richiesto dalla Direttiva Europea 2010/31 e permette di simulare accuratamente il comportamento termico di edifici esistenti caratterizzati da tecnologie costruttive "pesanti". L'adeguatezza del software in oggetto per l'analisi del comportamento termico di edifici esistenti, anche storici, tipici dell'edilizia Italiana e caratterizzati da soluzioni costruttive con elevata massa termica, è testimoniata e convalidata da numerosi studi condotti su queste particolari tipologie edilizie mediante l'utilizzo di EnergyPlus (Ascione et al., 2011; Evola et al., 2015; Ferrari, 2007)

Fra le altre caratteristiche di Energy Plus utili ai fini della presente ricerca si annoverano:

- La simulazione dettagliata dello scambio termico (strato per strato) attraverso tutte le tipologie di superfici vetrate attualmente in commercio con possibilità di modellazione di schermature solari fisse o mobili con controllo automatico;
- la simulazione dettagliata dei flussi d'aria fra zone termiche termiche.(Crawley et al., 2004, 2000).

3.1.2 Effetti della simulazione dinamica rispetto a quella semi-stazionaria delle norme UNI TS 11300.

E' sembrato opportuno testare direttamente il software dinamico utilizzato su casi di studio per i quali si hanno a disposizione i risultati dei calcoli condotti secondo le norme UNI TS 11300. Questi confronti sono stati fatti anche da altri autori (Corrado and

Paduos, 2010) ma, nel caso specifico della ricerca, era importante evidenziare la differenza in esame con casi di studio noti ed ufficiali considerato che uno degli obiettivi della ricerca è quello di proporre un confronto critico con i parametri di legge. A tal fine sono state simulate le prestazioni energetiche di 3 edifici-tipo, rappresentativi del patrimonio edilizio nazionale e caratterizzati da livelli di isolamento termico dell'involucro riferibili ai limiti normativi vigenti dal 2010 al Settembre 2015. I tre casi studio analizzati consistono in due edifici residenziali (una villetta isolate monofamiliare e un edificio multifamiliare con 6 appartamenti) e un piccolo edificio per uffici e sono stati elaborati dal Comitato Termotecnico Italiano (CTI) per la validazione dei software per la certificazione energetica nazionale degli edifici (CTI - Comitato Termotecnico Italiano, 2012, 2010a, 2010b). Nella Figura 3-3, Figura 3-4e Figura 3-5 sono riportate le planimetrie e i prospetti dei casi studio. Per gli approfondimenti relativi alle caratteristiche fisico tecniche dell'involucro edilizio si rimanda alle relative pubblicazioni del CTI Comitato Termotecnico Italiano (CTI - Comitato Termotecnico Italiano, 2012, 2010a, 2010b)



Figura 3-3 – Villetta: piano terra e prospetti

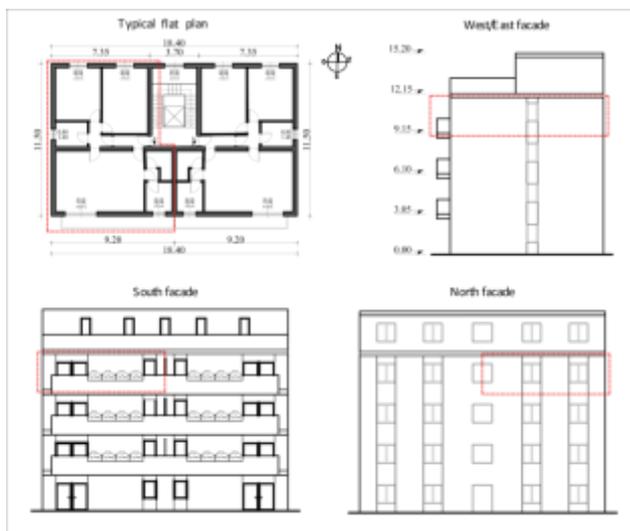


Figura 3-4 – Edificio multifamiliare: piano tipo e prospetti. L'appartamento oggetto di analisi è evidenziato dalla linea rossa

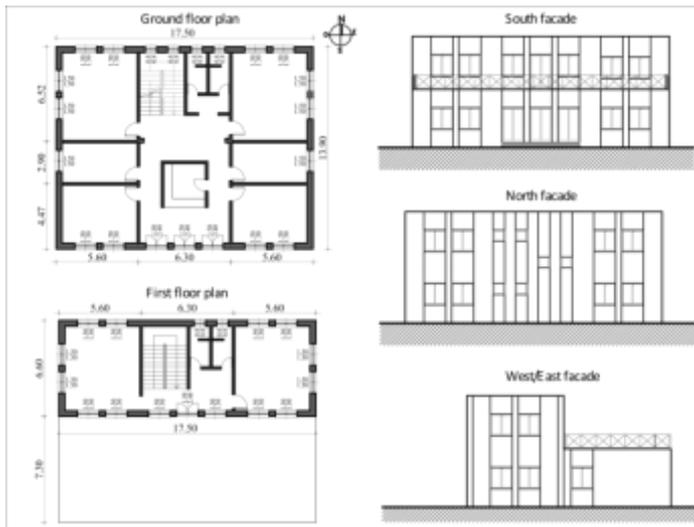


Figura 3-5 – Ufficio: piani terra e primo e prospetti

Le valutazioni di confronto sono avvenute a parità di condizioni climatica (profilo climatico di Milano Linate) e con condizioni al contorno riferite ai profili di utenza analoghe. In particolare data la diversa cadenza temporale con cui i due metodi di calcolo elaborano il bilancio termico dell'edificio (mensile e orario) è stato necessario modificare il file climatico orario di Milano Linate ("Energy Plus Weather Data," 2016) in modo tale che le medie mensili derivate coincidessero con i valori mensili derivati dalla norma UNI 10349¹² (UNI - Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 1994). Il confronto ha riguardato il calcolo del fabbisogno di energia termica per riscaldamento e per raffrescamento su base stagionale (regime invernale dal 15 Ottobre al 15 Aprile e regime estivo dal 1 Maggio al 31 Settembre), al netto dei ponti termici. La valutazione in modalità semi stazionaria è stata effettuata con il software MC 11300 v.2 secondo le norme di riferimento UNI TS 11300 parti 1 e 2 (Ente Nazionale Italiano di Unificazione - UNI, 2014a, 2014b). Come si può vedere dalla Figura 3-6 per tutti e tre gli edifici i valori dei fabbisogni calcolati con il software dinamico sono inferiori rispetto a quelli calcolati con il metodo semi stazionario. Ciò risulta coerente con quanto rilevato da altri ricercatori (Ferrari, 2007) (Asdrubali et al., 2009) (Ballarini et al., 2010) (Corrado and Paduos, 2010). Le differenze si attestano fra l'8% e il 20% con l'eccezione dell'ufficio in cui la differenza di fabbisogno energetico per riscaldamento supera il 40 %. Tale anomalia nei risultati è probabilmente attribuibile alla diversa modalità con cui i dei due

¹² La norma UNI 10349:1994 è stata la norma tecnica di riferimento ufficiale per i dati climatici mensili per la valutazione energetica degli edifici, fino al marzo 2016 quando è stata sostituita dalla UNI 10349-1:2016.

software di calcolo impiegati calcolano le dispersioni di calore per ventilazione meccanica in presenza di recuperatore di calore.

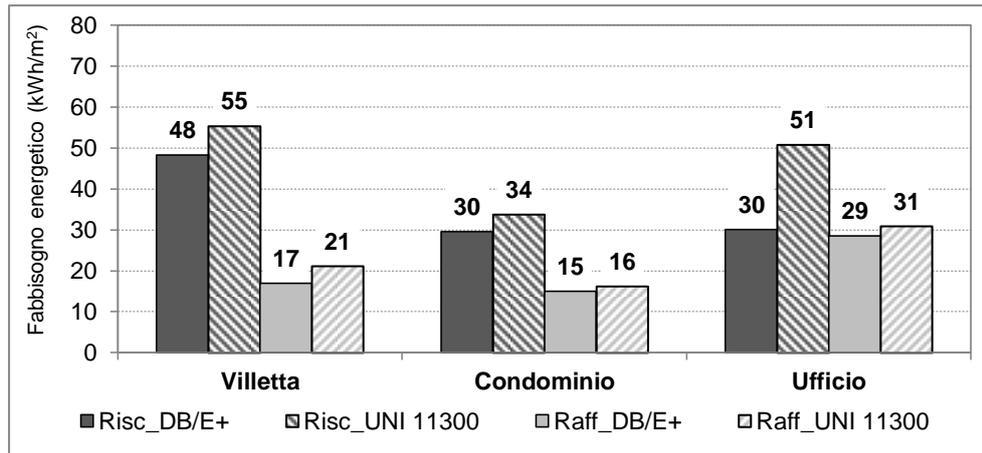


Figura 3-6 – Fabbisogno di energia termica (fabbisogno netto) per riscaldamento e raffrescamento dei 3 casi studio analizzati calcolato con il metodo quasi stazionario (CTI) e con il metodo dinamico dettagliato (DB).

3.1.3 Indicatori e condizioni al contorno

Coerentemente con le indicazioni del DM 26/6/ 2015 “Requisiti Minimi”) e con l’applicazione nazionale della Metodologia di calcolo europea per la determinazione dei livelli ottimali dei requisiti minimi di prestazione energetica in funzione dei costi (Ministero dello Sviluppo Economico, 2013) i risultati delle simulazioni energetiche sono espressi mediante l’indice di energia primaria totale per la climatizzazione invernale ed estiva ovvero il fabbisogno di energia primaria totale annuo per i suddetti servizi normalizzato per unità di superficie calpestabile dell’edificio ($EP_H + EP_C$). L’unità di misura è il kWh/m^2 (Ente Nazionale Italiano di Unificazione - UNI, 2016).

I fabbisogni per singolo vettore energetico (gas ed elettricità) risultanti dall’output delle simulazioni energetiche sono stati convertiti in fabbisogni di energia primaria impiegando i fattori di conversione totali ($f_{P,tot}$) indicati dal DM 26/6/2015 e riportati nella sottostante Tabella 3-2.

Tabella 3-2- Fattori di conversione in energia primaria dei vettori energetici (DM 26/6/2015)

Vettore energetico	$f_{P,ren}$	$f_{P,ren}$	$f_{P,tot}$
Gas naturale ⁽¹⁾	1,05	0	1,05
GPL	1,05	0	1,05
Gasolio e Olio combustibile	1,07	0	1,07
Carbone	1,10	0	1,10
Biomasse solide ⁽²⁾	0,20	0,80	1,00
Biomasse liquide e gassose ⁽²⁾	0,40	0,60	1,00
Energia elettrica da rete ⁽³⁾	1,95	0,47	2,42
Teleriscaldamento ⁽⁴⁾	1,5	0	1,5
Rifiuti solidi urbani	0,2	0,2	0,4
Teleraffrescamento ⁽⁴⁾	0,5	0	0,5
Energia termica da collettori solari ⁽⁵⁾	0	1,00	1,00
Energia elettrica prodotta da fotovoltaico, mini-eolico e mini-idraulico ⁽⁵⁾	0	1,00	1,00
Energia termica dall'ambiente esterno – free cooling ⁽⁵⁾	0	1,00	1,00
Energia termica dall'ambiente esterno – pompa di calore ⁽⁵⁾	0	1,00	1,00
⁽¹⁾ I valori saranno aggiornati ogni due anni sulla base dei dati forniti da GSE. ⁽²⁾ Come definite dall'allegato X del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152. ⁽³⁾ I valori saranno aggiornati ogni due anni sulla base dei dati forniti da GSE. ⁽⁴⁾ Fattore assunto in assenza di valori dichiarati dal fornitore e asseverati da parte terza, conformemente al quanto previsto al paragrafo 3.2. ⁽⁵⁾ Valori convenzionali funzionali al sistema di calcolo.			

Ai fini della ricerca non si considera il fabbisogno energetico per la produzione di ACS in quanto indifferente ai cambiamenti climatici e non assumibile come carico termico nel bilancio del fabbricato.

Analogamente non si sono considerati il fabbisogno energetico connesso ai servizi di illuminazione artificiale e trasporto di persone o cose in quanto, in riferimento a quanto stabilito dal DM 26/6/2015, la sua valutazione non è prevista per gli edifici destinati a civile abitazione. I carichi termici connessi all'illuminazione sono invece compresi nella quota forfettaria degli apporti interni descritti di seguito.

Le simulazioni e le valutazioni energetiche sono state eseguite sulla base delle seguenti ipotesi e condizioni al contorno, che riflettono un profilo di utenza standard, in rapporto alle indicazioni delle norme tecniche di riferimento:

- **Ponti termici** L'effetto di dispersione termica aggiuntivo dovuto ai ponti termici è considerato in maniera semplificata come incremento della trasmittanza termica media delle strutture disperdenti opache in accordo con quanto previsto dalle indicazioni metodologiche condivise del progetto TABULA (TABULA

Project Team, 2013) e con il metodo semplificato previsto dalla norma UNI EN ISO 13790¹³ (UNI - Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 2008b). Tale approccio risulta inoltre coerente anche con il fatto che i valori limiti per le trasmittanze termiche degli elementi d'involucro opachi forniti dal DM 26/06/2015 sono comprensivi dell'effetto dei ponti termici (vedi paragrafo 1.2.2);

- **Attivazione impianto e temperatura operativa**. Al fine di garantire condizioni di benessere termico standardizzate e costanti anche a fronte dei cambiamenti climatici previsti, si ipotizza che il sistema di climatizzazione sia disponibile (attivabile 24 ore su 24) e, mantenga la **temperatura operativa** interna (θ_o) a 20°C durante il periodo di riscaldamento e a 26°C durante il periodo di raffrescamento¹⁴. Questo approccio rende possibile, a parità di servizio erogato, il confronto, fra alternative progettuali diverse in base al valore assunto dall'indicatore prestazionale impiegato per la valutazione (fabbisogno di energia primaria totale);
- **Tasso di ricambio** d'aria costante sulle 24 ore pari a 0,3 vol/h, che include le infiltrazioni d'aria e che è ritenuto, sufficiente ad assicurare condizioni igieniche accettabili per un profilo di utenza standard (Ente Nazionale Italiano di Unificazione - UNI, 2014a);
- **Apporti interni** dovuti alla presenza delle persone, al calore prodotto dalle apparecchiature domestiche e dall'illuminazione artificiale, , sono stati considerati costanti sull'arco delle 24 ore per tutti i giorni dell'anno e pari a 3 W/m², sulla base delle indicazioni metodologiche del progetto TABULA

¹³ “Nel caso di edifici esistenti vecchi, se nessuna informazione o informazioni limitate sono disponibili sui ponti termici della costruzione, potrebbe non essere appropriato utilizzare valori di default conservativi se la finalità è fornire un certificato di prestazione energetica (informativo). Inoltre, valori di default conservativi per edifici altamente isolati non sono adeguati per edifici scarsamente isolati. Un metodo semplice a questo scopo può consistere in valori di default che dipendano dal valore di U medio della costruzione e/o dall'età dell'edificio.” (UNI - Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 2008b)

¹⁴ Rimandando al paragrafo 4.4.4 per ulteriori dettagli si evidenzia come i modelli di edificio tipo impiegati nella simulazioni, coerentemente con i risultati dell'analisi del campione edilizio di riferimento, siano tutti dotati di impianto di climatizzazione (riscaldamento e raffrescamento) individuale.

(TABULA Project Team, 2013). Gli apporti interni sono considerati come apporto di calore sensibile introdotto esclusivamente per convezione;

- **Chiusure oscuranti.** L'effetto dell'isolamento termico notturno aggiuntivo delle superfici trasparenti, dovuto alla presenza delle schermature costituite dagli avvolgibili¹⁵ non è stato cautelativamente considerato;
- **Schermature.** L'attivazione delle schermature avviene sulla base di programma riferito all'intensità dell'irraggiamento esterno incidente (300 W/m^2) secondo quanto previsto dalla norma UNI/TS 11300-1 (Ente Nazionale Italiano di Unificazione - UNI, 2014a).
- **Temperatura del terreno.** L'andamento mensile della temperatura è calcolato sulla base del file climatico attuale mediante il modulo di calcolo Slab di Energy Plus (Lawrence Berkeley National Laboratory, 2013) ed è stato lasciato invariato nei periodi futuri in considerazione del suo trascurabile incremento;
- **Albedo.** La riflettanza solare del terreno è stata considerata pari a 0,2.

3.2 Validazione del software su caso di studio reale e simulazioni energetiche preliminari su edifici CTI

Per completare la validazione degli strumenti della ricerca si è stato ritenuto opportuno :

- a) Verificare l'uso del codice di calcolo Energy Plus su un edificio reale in rapporto alla finalità dello studio e alle caratteristiche tecnologiche del parco edilizio analizzato;
- b) Verificare la validità delle ipotesi poste a base della ricerca (variazione della composizione e dell'entità dei consumi a fronte dell'aumento delle temperature) mediante simulazioni preliminari del comportamento energetico di modelli di edifici standard sottoposti all'effetto dei previsti cambiamenti climatici.

¹⁵ Gli edificio tipo impiegati nella simulazioni (paragrafo 4.4.4), coerentemente con i risultati dell'analisi del campione edilizio di riferimento, sono dotati di avvolgibili in legno o plastica in qualità di chiusure oscuranti.

3.2.1 Edificio reale

Al fine di verificare la validità del codice di calcolo Energy Plus in rapporto alla finalità dello studio e alle caratteristiche tecnologiche del parco edilizio analizzato, sono state condotte simulazioni energetiche in regime dinamico di un caso studio rappresentato da un condominio di 19 appartamenti e 8 piani fuori terra costruito a Firenze alla fine degli anni '50 che nel corso degli anni non ha subito interventi di riqualificazione significativi dal punto di vista energetico (Figura 3-7). Il caso di studio presenta caratteristiche tipologiche e tecnologiche che lo rendono congruente rispetto al patrimonio di edilizia residenziale pubblica a cui la presente ricerca fa riferimento.

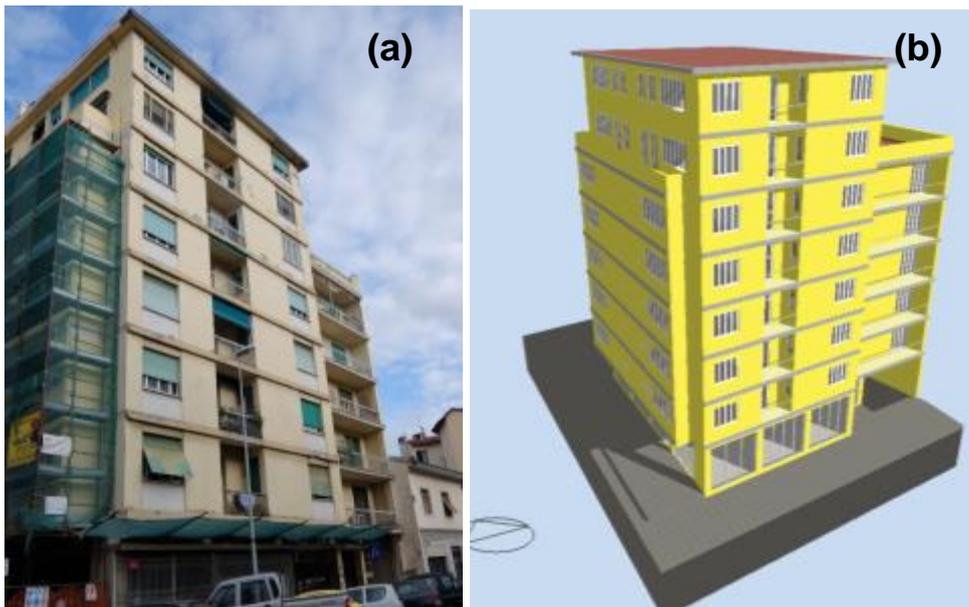


Figura 3-7 Immagine della facciata sud dell'edificio (a) e immagine del modello di simulazione (b).

L'edificio presenta una struttura portante in pilastri e travi in calcestruzzo armato con tamponamenti esterni in muratura non isolata e solai interpiano e di copertura di tipo latero-cementizio. L'impianto di riscaldamento a radiatori è centralizzato e non presenta la possibilità di regolazione nei singoli appartamenti. Il sistema di raffrescamento estivo è costituito da impianti autonomi ad espansione diretta installati nel corso degli anni in tutti gli appartamenti. (Carletti et al., 2015)¹⁶.

Nella prima fase dell'analisi è stata effettuata una valutazione energetica dell'edificio in modalità *tailored rating* (profili di occupazione, tassi di ventilazione, gestione degli

¹⁶ La pubblicazione citata, pubblicata negli atti del convegno CIRIAF 2015, di cui il dottorando è co-autore è stata elaborata e pubblicata nell'ambito della ricerca di Dottorato.

impianti di climatizzazione desunti sulla base dei dati forniti dal terzo responsabile della centrale termica e dei risultati dei sondaggi svolti fra i condomini) al fine di simulare i fabbisogni di gas per riscaldamento e confrontarli con i corrispondenti consumi effettivi medi annui rilevati nel periodo 2000– 2009¹⁷. I primi, pari a 168625 kWh (corrispondenti a 75,4 kWh/(m²a)), si discostano di circa il 7% rispetto ai consumi reali che sono pari a 180696 kWh¹⁸ e corrispondono ad un consumo medio specifico per unità di superficie netta calpestabile di 80,8 kWh/(m²a). L'esito di tale confronto permette, pur con le limitazioni del caso, di ritenere il modello elaborato adeguatamente preciso in rapporto alle necessità di sviluppo della metodologia della ricerca.

Coerentemente con l'impostazione metodologica della ricerca, il modello tarato è stato impiegato, ipotizzando un profilo di utenza standard (valutazione di tipo *asset rating*) per valutare il fabbisogno energetico necessario al solo involucro edilizio per mantenere condizioni di benessere termico (temperatura operativa mantenuta costante sull'intero arco delle 24h a 20°C in inverno e 26°C in estate) a fronte di scenari climatici futuri generati con la metodologia di cui al paragrafo 2.4. In pratica il modello è stato depurato dal comportamento dell'utenza e delle specifiche impiantistiche per evidenziare, in primis, la risposta dell'involucro edilizio ai previsti cambiamenti climatici.

Nella Figura 3-8, Figura 3-9 e Figura 3-10 sono mostrati i risultati delle simulazioni del caso di studio in regime invernale ed estivo.

¹⁷ La scelta di tale periodo di consumo è giustificata dal fatto che il file climatico impiegato per la simulazione, come illustrato nel paragrafo 2.3, è stato elaborato sulle base delle serie storiche climatiche del medesimo periodo (CTI - Comitato Termotecnico Italiano, 2016b).

¹⁸ Il fattore di conversione impiegato è pari a 9,423 Sm³/ kWh (Ente Nazionale Italiano di Unificazione - UNI, 2014b) considerando che 1 Nm³ = 1.0549 Sm³

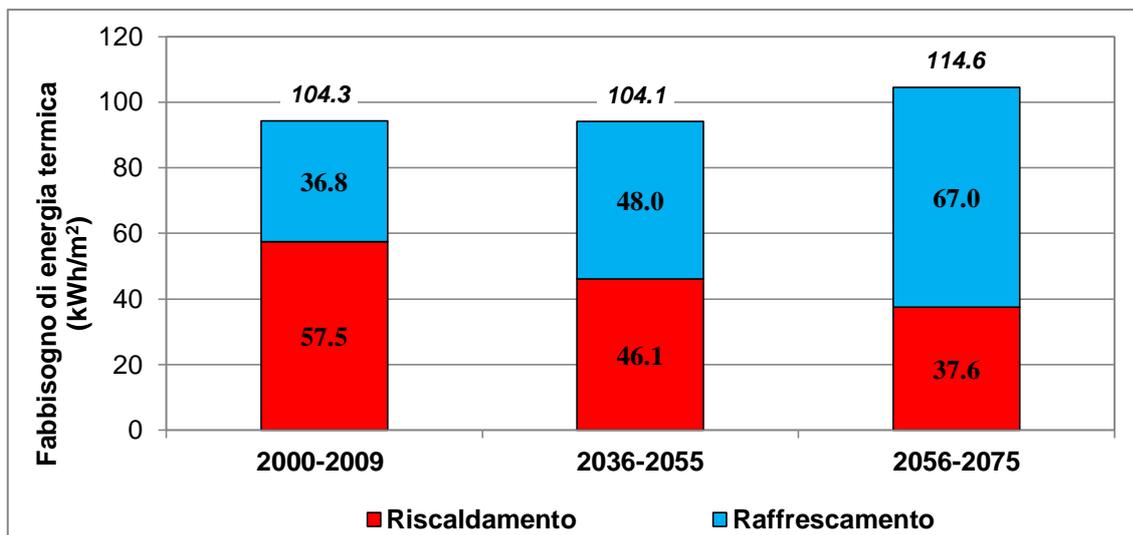


Figura 3-8 - Fabbisogno di energia termica utile annuale in funzione dei mutamenti climatici.

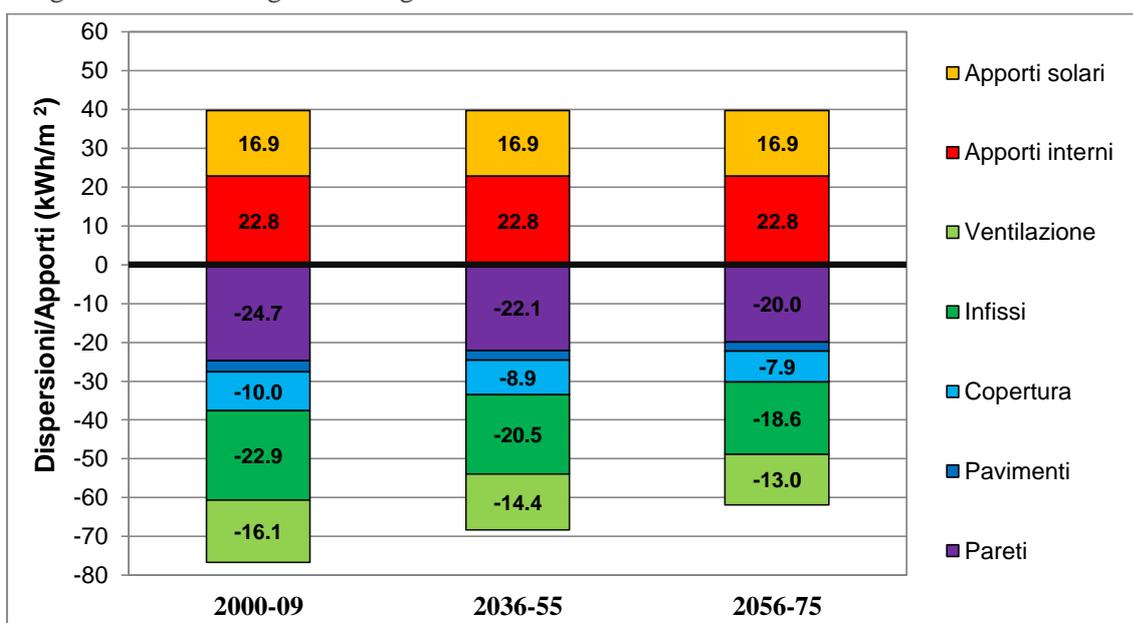


Figura 3-9 - Bilancio energetico invernale dell'involucro edilizio in funzione dei mutamenti climatici.

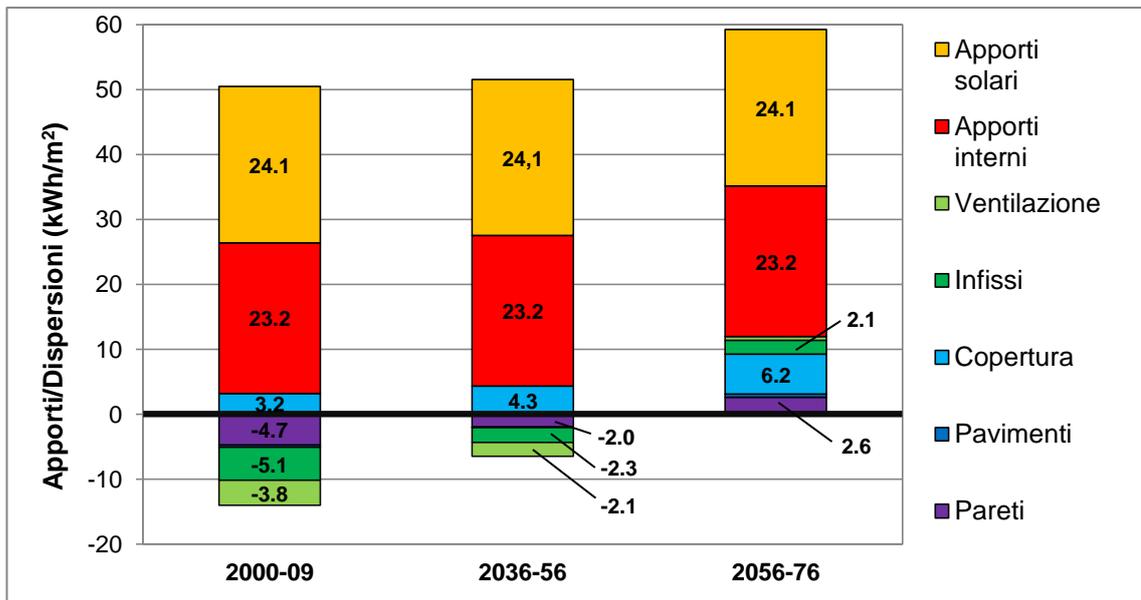


Figura 3-10 - Bilancio energetico estivo dell'involucro edilizio in funzione dei mutamenti climatici.

I risultati delle simulazioni sottolineano come il bilancio energetico annuale vede il progressivo spostamento dei consumi da riscaldamento a raffrescamento. In particolare sul lungo periodo l'aumento dei consumi estivi potrebbe non essere compensato dalle condizioni invernali più favorevoli. Da sottolineare come in regime invernale, anche a fronte del previsto riscaldamento climatico, la riduzione delle dispersioni dalle pareti ma soprattutto dai serramenti, risulti un intervento strategico in considerazione dell'importanza del contributo di queste classi di elementi tecnici al bilancio termico dell'involucro. Una particolare attenzione è da porre al ruolo giocato nel bilancio energetico estivo della ventilazione che, allo stato attuale e nel breve termine, rappresenta a livello stagionale una dispersione e quindi una risorsa per il raffrescamento passivo dell'edificio; sul lungo periodo, invece, finisce per costituire un apporto di calore da ridurre. Ulteriore elemento critico dell'involucro per quanto riguarda gli apporti di calore estivi è rappresentato dalla copertura, il cui coefficiente di riflessione solare è infatti oggetto di disposizioni del recente decreto sui requisiti minimi di prestazione energetica degli edifici (DM 26/6/2015). Di particolare importanza risulta il contenimento degli apporti solari, che pur tendenzialmente immutati nel futuro, in ragione del decremento delle dispersioni attraverso l'involucro, tendono a dominare sempre più il bilancio energetico estivo.

In breve, da questi risultati preliminari, emerge la necessità e l'utilità di investigare e approfondire il ruolo gli effetti dei mutamenti climatici sul bilancio energetico degli

edifici al fine di individuare in maniera informata e consapevole interventi di riqualificazione e strategie di progettazione efficaci ai fini del contenimento delle emissioni e del comfort termico.

3.2.2 Edifici standard CTI

Al fine di una ulteriore conferma delle ipotesi poste a base della presente ricerca sull'importanza del cambiamento climatico¹⁹, i 3 edifici tipo del CTI precedentemente descritti nel paragrafo 3.1.1, (casa isolata, condominio, ufficio), sono stati oggetto di simulazione in regime dinamico con file climatici che tengano conto del progressivo riscaldamento (Pierangioli et al., 2017)²⁰. A tal fine sono stati presi in considerazione diversi livelli di isolamento termico riferibili a diverse epoche di costruzione (anni '60 e dal 2010 al 2015), oltre a varie misure passive di efficientamento energetico (isolamento termico dell'involucro opaco e degli infissi, incremento del coefficiente di riflessione delle superfici esterne, incremento della capacità termica, schermature solari delle superfici trasparenti, incremento della ventilazione naturale, riduzione degli apporti di calore interni). Le prestazioni energetiche sono state valutate nel medio (2036-2065) e lungo termine (2066-2095) sulla base delle condizioni al contorno climatiche illustrate nel paragrafo 2.4 per la località di Firenze. Le simulazioni, in analogia a quanto illustrato nel paragrafo 3.1.3, sono state condotte impostando un livello di comfort termico costante che si immagina fornito da un impianto ideale caratterizzato da rendimento unitari e ipotizzando un tipo di utenza standardizzata. Questo approccio ha consentito di confrontare le prestazioni delle diverse strategie di adattamento in base al valore assunto dall'indicatore prestazionale adottato uguale al fabbisogno netto dell'involucro edilizio per il riscaldamento ($Q_{H,nd}$) e il raffrescamento ($Q_{C,nd}$). La scelta di tale indicatore è coerente con l'obiettivo di valutare le prestazioni passive dell'involucro (opaco e trasparente) e l'adattamento delle azioni progettuali ai cambiamenti climatici.

¹⁹ In conseguenza del riscaldamento globale in atto, gli edifici residenziali in area mediterranea non saranno in grado di garantire le condizioni di benessere termico per i quali sono stati progettati con un conseguente consistente aumento del fabbisogno energetico per la climatizzazione estiva.

²⁰ La pubblicazione citata, accettata dalla rivista Building Simulation e in fase di stampa, di cui il dottorando è co-autore è stata elaborata e pubblicata nell'ambito della ricerca di Dottorato.

In conseguenza dell'aumento delle temperature, i risultati (Figura 3-11) mostrano che per gli edifici esistenti non isolati solo nel medio termine la riduzione del fabbisogno di energia per il riscaldamento bilancia l'incremento del fabbisogno per raffrescamento mantenendo invariati i consumi totali annui; ,su lungo termine, invece, a causa dell'elevato incremento dei consumi per la climatizzazione estiva tali edifici aumentano il fabbisogno totale annuo passando dal 4 al 12% di incremento. Per gli edifici con livelli di isolamento attuali la situazione è persino peggiore e in entrambi i periodi, in quanto il fabbisogno totale annuo aumenta in maniera sensibile (dal 19% al 35% rispettivamente su breve e lungo termine. Questo risultato indica che gli interventi di isolamento dell'involucro opaco e trasparente devono essere preventivamente valutati a fronte anche dei cambiamenti climatici attesi al fine di verificare che questo tipo di misura non produca effetti controproducenti (McLeod et al., 2013a; Robert and Kummert, 2012). I risultati suddetti inducono a pensare che , gli edifici costruiti in Italia in zone climatiche non sfavorite a partire dall'ottobre 2015, con elevati livelli di isolamento, possano subire in modo ancor maggiore gli effetti dei cambiamenti climatici con i consumi energetici dominati dal raffrescamento. Sul fronte impiantistico si vede, peraltro al momento incentivati, una rapida espansione dei sistemi di climatizzazione a pompa di calore reversibili.

Ovviamente ed a scanso di equivoci, è necessario sottolineare che, in termini assoluti, il fabbisogno energetico totale annuale degli edifici non isolati è mediamente del 60% maggiore degli edifici isolati, anche se in termini relativi sembrano rispondere meglio ai cambiamenti climatici.. Le analisi condotte spingono inoltre a porre sempre più attenzione agli apporti interni e solari ed alla ventilazione che tenderanno nel tempo a diventare i principali contribuenti del bilancio termico dei fabbricati.

Per quanto attiene i risultati riguardanti gli incrementi di fabbisogno termico per la sola climatizzazione estiva (livello di isolamento termico riferito agli anni '60) si è calcolato un incremento dal 37% al 49% sul breve termine e dal 100% al 136% sul lungo termine; questo porterebbe ad una sempre maggior diffusione degli impianti di climatizzazione estiva in ambito residenziale. Tale ipotesi confermerebbe peraltro la tendenza che ha visto, soprattutto negli anni precedenti alla crisi edilizia, crescere in maniera esponenziale il numero di installazioni di sistemi di raffrescamento reversibili aria-aria ad espansione diretta del tipo split o multi-split (Toso and Mura, 2014). A tal proposito de Wilde e Coley (2012) sottolineano come gli impatti del cambiamento climatico sulla

prestazione energetica degli edifici siano di particolare rilevanza quando, non solo implicano un aumento dei consumi energetici di edifici del terziario già dotati di climatizzazione estiva, ma costringono anche gli utenti degli edifici residenziali ad adeguare le proprie abitazioni installando ex-novo un sistema di raffrescamento che consenta il raggiungimento delle desiderate condizioni di benessere termico estivo.

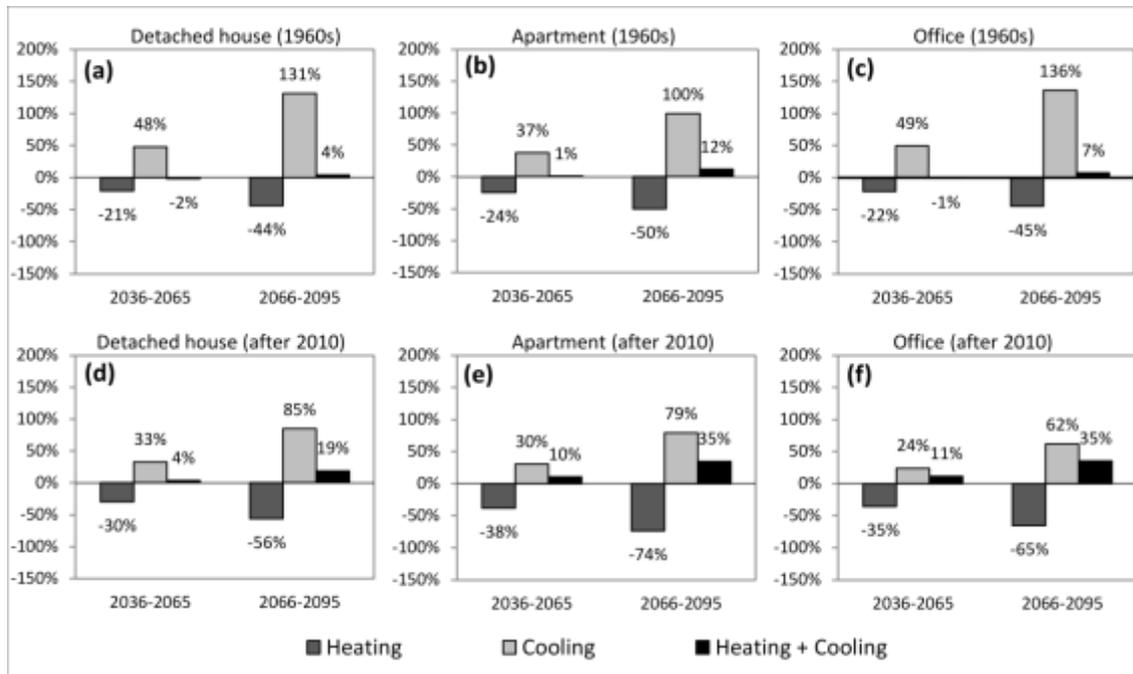


Figura 3-11 - Variazione percentuale del fabbisogno netto per riscaldamento e raffrescamento dei tre edifici tipo con diversi livelli di isolamento termico nei due periodi futuri

Riguardo alla valutazione delle misure di adattamento, nella Figura 3-12 sono riportate le prestazioni energetiche delle misure di adattamento ai cambiamenti climatici risultate maggiormente efficaci per i tre edifici analizzati in rapporto ai due livelli di isolamento previsti (anni '60 e 2010). Anche se questi risultati non possono essere utilizzati per fornire soluzioni definitive, essi permettono di evidenziare la tendenza di variazione nel tempo dell'efficacia di dette misure per edifici nuovi ed esistenti in Italia Centrale.

Coerentemente con i risultati illustrati in precedenza, per gli edifici esistenti non isolati costruiti precedentemente alla fine degli anni '70, l'intervento più efficace nel ridurre nel tempo il fabbisogno energetico totale a fronte degli attesi cambiamenti climatici, risulta l'isolamento termico dell'involucro opaco e trasparente, mentre le schermature solari e l'incremento della ventilazione naturale risultano al confronto scarsamente efficaci.

Considerando edifici costruiti con gli attuali livelli di isolamento termico, le prestazioni migliori si ottengono con la sostituzione degli infissi, l'introduzione delle schermature solari e l'incremento della ventilazione notturna, che tuttavia, al contrario delle schermature, tende a perdere la propria efficacia nel tempo come evidenziato anche nelle simulazioni preliminari dell'edificio reale (paragrafo 3.2.1).

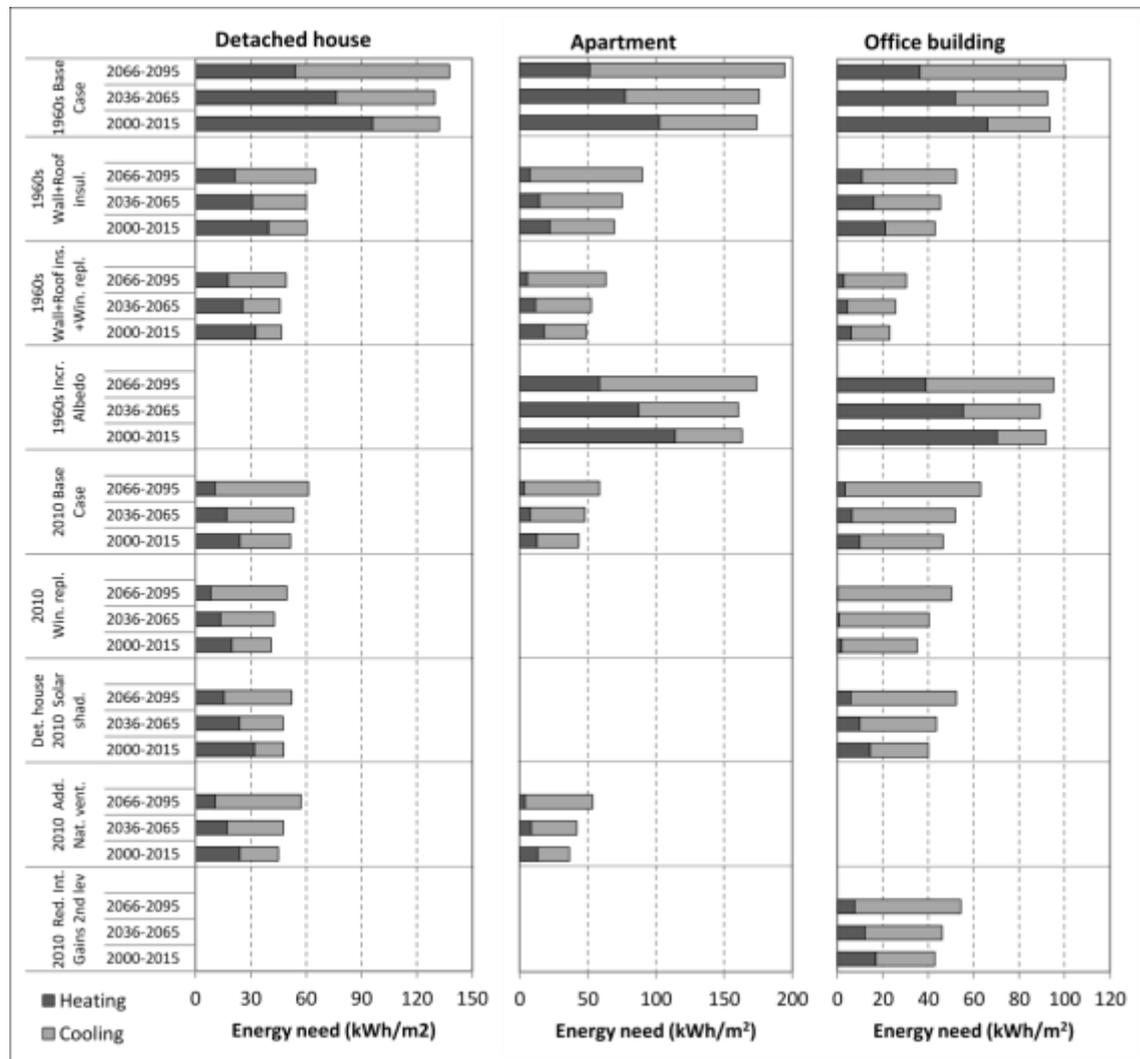


Figura 3-12 – Fabbisogno energetico netto per riscaldamento e raffrescamento dei tre edifici analizzati con le misure di adattamento ai cambiamenti climatici risultate maggiormente efficaci.

I risultati ottenuti concordano con quelli di ricerche similari riportate nel paragrafo 1.1.

In generale si può concludere che, a causa della diversa entità con cui i fabbisogni per raffrescamento tendono ad aumentare nel tempo, perfino raddoppiando il proprio valore, e quelli per riscaldamento a diminuire, quasi azzerandosi, in funzione del livello di isolamento termico di partenza e del tipo di strategia di adattamento adottata, è

necessario porre una particolare attenzione ai diversi tipo di riqualificazione energetica che devono essere selezionati previa accurata valutazione della loro efficacia nel tempo.

In particolare emerge la necessità di scegliere soluzioni, in grado di mantenere nel tempo le prestazioni attese a fronte delle tendenze climatiche illustrate: su questo aspetto ha una notevole influenza sia il decadimento prestazionale dell'intervento stesso che il comportamento dell'utenza. Da questo punto di vista può essere strategico scegliere soluzioni, come ad esempio le schermature mobili o i sistemi di ventilazione, le cui prestazioni possono essere adattate, manualmente o in maniera automatizzata, alle specifiche condizioni climatiche.

In particolare emerge la necessità di scegliere soluzioni, in grado di mantenere nel tempo le prestazioni attese a fronte delle tendenze climatiche illustrate: su questo aspetto ha una notevole influenza sia il decadimento prestazionale dell'intervento stesso che il comportamento dell'utenza. Da questo punto di vista può essere strategico scegliere soluzioni, come ad esempio le schermature mobili o i meccanismi manuali di ventilazione, sui quali l'utente agisce adattandone le prestazioni alle specifiche condizioni climatiche.

3.3 Analisi economica: calcolo del costo globale degli interventi

In base alla Direttiva 2010/31/UE (EPBD recast), al fine di correlare la prestazione energetica degli interventi di riqualificazione energetica, con una valutazione economica sul lungo periodo, è stato determinato il costo globale di ciascun degli interventi analizzati. I calcoli sono stati effettuati applicando la metodologia europea di cui al Regolamento Delegato UE N. 244/2012 (*Regolamento UE 244/2012*, 2012) e alle linee guida di orientamento che lo accompagnano e tenendo conto delle indicazioni e dei dati di input utilizzati nell'applicazione nazionale della metodologia di calcolo dei livelli ottimali in funzione dei costi per i requisiti minimi di prestazione energetica (Ministero dello Sviluppo Economico, 2013).

Il costo globale è stato espresso in termini di valore attuale netto²¹ (VAN) calcolato su un periodo di tempo corrispondente al ciclo di vita atteso dell'edificio²².

Si prevede che il calcolo del VAN possa essere condotto secondo la prospettiva finanziaria o secondo una prospettiva macroeconomica. In pratica nel primo caso si adotta il punto di vista dell'utente (amministratore, proprietario, gestore immobiliare, etc.) che decide di efficientare un edificio, investendo denaro attuale con l'attesa di un risparmio futuro in termini di riduzione dei costi energetici, e a tal fine prende in considerazione solamente gli effetti finanziari dell'investimento senza considerare le ricadute in termini di costi e benefici per tutto il sistema economico e sociale (prospettiva macroeconomica).

Coerentemente con gli obiettivi generali della ricerca indirizzati principalmente agli amministratori, ai tecnici e agli operatori economici coinvolti nell'efficientamento energetico dei parchi edilizi esistenti, si è scelto di adottare la **prospettiva finanziaria**.

In tale prospettiva il VAN degli interventi è stato calcolato con la seguente formula:

$$C_g(\tau) = C_I + \sum_j \left[\sum_i^{\tau} (C_{a,i}(j) \times R_d(i)) - V_{f,\tau}(j) \right] \quad [1]$$

dove

τ è il periodo di calcolo

$C_g(\tau)$ rappresenta il costo globale (riferito all'anno iniziale τ_0) nel periodo di calcolo considerato

²¹ Il VAN è un metodo di valutazione finanziaria di progetti a medio e lungo termine mediante il quale viene calcolato il valore attuale di una serie di flussi di cassa previsti sommandoli e attualizzandoli sulla base di un fattore di attualizzazione legato al tasso di sconto. In pratica si confrontano investimenti alternativi riconducendo ad un medesimo orizzonte temporale flussi di cassa non contemporanei e, quindi, non direttamente confrontabili.

²² Nell'interpretazione fornita dagli orientamenti che accompagnano il regolamento delegato (UE) n. 244/2012, il periodo su cui viene calcolato il costo globale, corrispondente al ciclo di vita atteso dell'edificio, è determinato sulla base del "cosiddetto ciclo di ristrutturazione di un edificio, ovvero il lasso di tempo in cui un edificio è sottoposto a una ristrutturazione completa, comprendente un miglioramento dell'edificio nel suo complesso e un adeguamento alle modifiche dei requisiti degli utenti (invece di una semplice sostituzione). Le ragioni alla base di una ristrutturazione profonda sono molteplici: una di esse può essere, ad esempio l'invecchiamento di elementi importanti (ad esempio, le facciate) di un edificio. I cicli di ristrutturazione sono molto diversi a seconda del tipo di edifici ma in generale la loro durata non è mai inferiore a 20 anni"(Commissione Europea, 2012).

C_I rappresenta il costo iniziale dell'investimento per l'intervento j

$C_{a,i}(j)$ rappresenta il costo annuale durante l'anno i per l'intervento j

$V_{f,\tau}(j)$ rappresenta il valore residuo della misura o dell'insieme di misure j alla fine del periodo di calcolo (attualizzato all'anno iniziale τ_0)

$R_d(i)$ rappresenta il fattore di sconto per l'anno i sulla base del tasso di sconto r da calcolare con la formula $R_d(p) = \left(\frac{1}{1+r/100}\right)^p$ dove p rappresenta il numero di anni del periodo di calcolo.

Sulla base della formula [1] sono stati inclusi nel calcolo i seguenti flussi di cassa:

- Il costo (investimento) iniziale per la fornitura, l'installazione o la posa in opera delle diverse misure di efficienza energetica che compongono l'intervento di riqualificazione analizzato;
- I costi annui di manutenzione di ciascuna misura di efficienza energetica considerata;
- Il costo di sostituzione delle misure di efficienza energetica al termine della loro vita utile se inferiore al periodo di calcolo;
- Il valore residuo delle misure di efficienza energetica se la loro vita utile eccede il periodo di calcolo
- I costi connessi ai consumi energetici connessi a ciascun intervento (combinazione delle diverse misure di efficienza energetica) derivanti dalle simulazioni energetiche descritte in precedenza.

Nella determinazione dei costi di investimento, di manutenzione, di sostituzione e energetici sono state considerate tutte le tasse, le imposte e le accise che graverebbero realmente sull'investitore. Come consentito dal Regolamento UE 244/2012, sono escluse dal calcolo le sovvenzioni e gli incentivi fiscali che accompagnano la realizzazione delle maggior parte degli interventi e delle misure di efficienza energetica considerate. Tale scelta è giustificata dalla durata limitata di tali provvedimenti rispetto al periodo di calcolo considerato e dall'incertezza insita nella determinazione delle dinamiche future del loro valore.. Non sono stati altresì considerati i ricavi derivanti dalle vendite di energia elettrica prodotta con fotovoltaico e cogenerazione in quanto, come specificato nell'introduzione, l'analisi di questo tipo di misure non rientra nell'ambito della presente ricerca. Infine coerentemente con quanto previsto dal Regolamento Delegato UE 244/2012 i costi da sostenere per lo smaltimento delle

misure di efficienza energetica al termine della loro vita utile non sono stati inclusi nel calcolo .

Il **periodo di calcolo** (o ciclo di ristrutturazione completa/ricostruzione di un edificio) per le applicazioni nazionali relative agli edifici residenziali è fissato, dal Regolamento UE 244/2012, in 30 anni. Al fine di determinare i periodi di calcolo si è tenuto conto dei seguenti fattori:

- La vetustà elevata degli edifici residenziali e la lentezza del processo di riqualificazione completa o di ricostruzione/sostituzione del patrimonio edilizio nazionale (Centro ricerche economiche, sociologiche e di mercato nell'edilizia - CRESME, 2012)
- i requisiti minimi di prestazione energetica per gli edifici, introdotti dal DM 26/06/2015, a regime, a partire dal 01/01/2021, riguarderanno edifici nuovi o ristrutturati la cui vita utile si estenderà ben oltre il 2050, fino al limite del 2100.

In considerazione di ciò e da contributi specifici sull'argomento (Asdrubali et al., 2012, 2013; de Wilde and Coley, 2012; Di Giulio and Croce, 2003) sono stati fissati due periodi di calcolo corrispondenti a 50 e 80 anni. L'orizzonte temporale per la valutazione energetica ed economica delle misure di efficientamento è quindi articolato su due periodi: medio termine (2015-2065) e lungo termine (2015-2095). Il calcolo del costo globale degli interventi in ciascuno di questi due periodi fa riferimento alla prestazione energetica determinata sulla base del corrispondente profilo di cambiamento climatico previsto (vedi Paragrafo 2.4).

Nel caso in cui la durata della vita utile di una delle misure di efficienza energetica sia inferiore al periodo di calcolo sono stati contabilizzati e attualizzati i costi di sostituzione della misura stessa. Tali costi sono computati, analogamente al tasso di sconto, al netto dell'inflazione e quindi posti uguali al costo iniziale²³ senza tenere conto, di una possibile riduzione dei prezzi dovuta al progresso tecnologico e alla maggiore diffusione sul mercato (Ministero dello Sviluppo Economico, 2013). A tal proposito si considera che gli interventi di riqualificazione energetica analizzati (capitolo 5) non riguardano sistemi in forte evoluzione tecnologica, come ad esempio il fotovoltaico o il *building automation*, ma fanno riferimento a tecnologie ormai mature e la cui diffusione

²³ Questo significa che in termini nominali i prezzi crescono con lo stesso andamento del tasso generale di inflazione.

di mercato è ormai consolidata da molto tempo. Per questo motivo l'adozione della suddetta ipotesi appare giustificata.

Nel caso, in cui la vita utile della misura (eventualmente già oggetto di sostituzione) superi il termine del periodo di calcolo si aggiunge al costo globale, tramite opportuna attualizzazione, il valore residuo determinato ipotizzando un deprezzamento lineare durante la vita utile della misura (Figura 3-13).

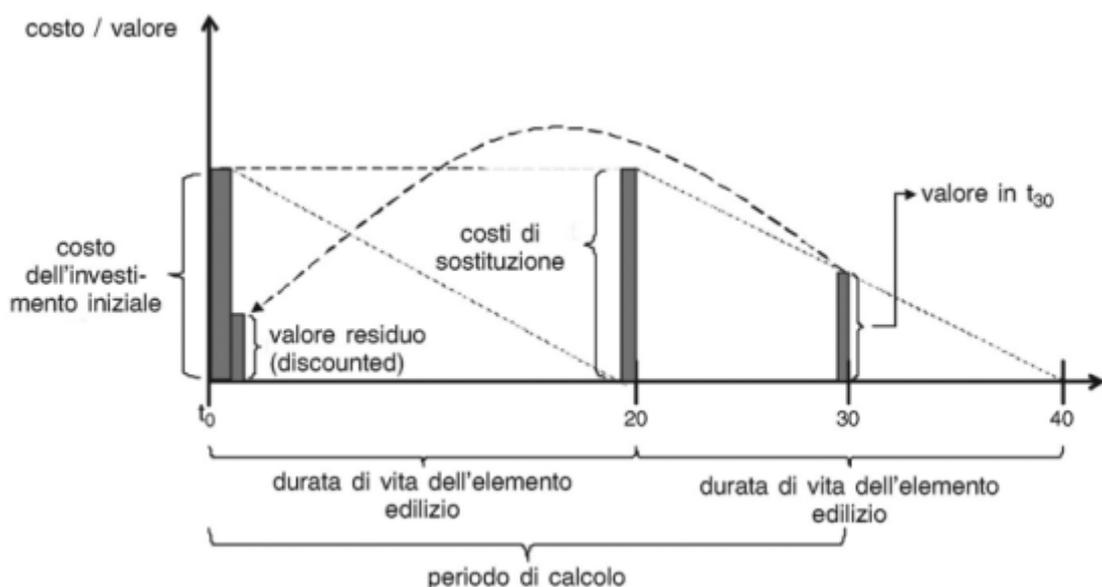


Figura 3-13 - Calcolo del costo di sostituzione e del valore residuo di un elemento edilizio con ciclo di vita più breve del periodo di calcolo (Commissione Europea, 2012)

I **tassi di sconto**²⁴ r da impiegare nei calcoli economici sono stati fissati al 3% e 5%²⁵. Tali valori sono fissati seguendo le indicazioni delle linee guida allegate al Regolamento UE 244/2012, con l'obiettivo di riflettere differenti approcci agli interventi di riqualificazione energetica: da quelli orientati prevalentemente al risparmio

²⁴ Il tasso di sconto è espresso in termini reali, escludendo quindi l'inflazione.

²⁵ Tassi di sconto maggiori generano una diminuzione del costo globale dell'intervento e favoriscono investimenti in interventi meno efficienti dal punto di vista energetico. Questo accade poiché, in questo tipo di scenario, i maggiori costi energetici da sostenere in futuro sono compensati dal ridotto valore attuale che questi costi assumono una volta attualizzati.

economico sul breve periodo (5%) a quelli orientati verso scelte che valorizzino l'efficienza energetica e la riduzione delle emissioni (3%)²⁶.

Per quanto riguarda **i costi di fornitura e posa in opera, i costi di manutenzione e la vita utile delle misure di efficienza energetica** si rimanda al capitolo 5. Occorre precisare come, in accordo con le indicazioni europee (Commissione Europea, 2012; *Regolamento UE 244/2012*, 2012) dal computo dei costi sono esclusi:

- i costi relativi agli elementi edilizi che non hanno alcuna influenza sulla prestazione energetica dell'edificio (ad esempio gli interventi di finitura e tinteggiatura);
- i costi che rimangono costanti fra le diverse misure di efficienza energetica che coinvolgono il medesimo elemento tecnico e non determinano una differenza nella prestazione energetica. (ad esempio per quanto riguarda le ristrutturazioni edilizie il costo dei ponteggi in interventi di isolamento termico delle pareti esterne, i costi di demolizione, etc.).

Tale approccio è coerente con gli obiettivi della ricerca che mirano ad un confronto fra le prestazioni energetiche di differenti strategie di intervento in funzione del costo globale senza aspirare alla stima dettagliata dei costi degli interventi di efficientamento energetico. A tal proposito, viceversa, il gruppo di lavoro coordinato dal Ministero dello Sviluppo Economico per l'applicazione nazionale della metodologia di calcolo dei livelli ottimali in funzione dei costi ha evidenziato che la metodologia europea non tenendo conto dei suddetti costi indiretti può condurre a risultati che potrebbero essere non corretti e comunque fuorvianti se interpretati dagli utenti finali²⁷.

²⁶ “Un tasso di sconto superiore — in genere superiore al 4 % [...] rifletterebbe un approccio puramente commerciale, e di breve termine, alla valutazione degli investimenti. Un tasso di sconto inferiore — compreso in genere tra il 2 % e il 4 % esclusa l'inflazione — riflette con maggiore fedeltà i benefici che gli investimenti nell'efficienza energetica apportano agli occupanti degli edifici per l'intero ciclo di vita dell'investimento”. (Linee guida allegate al Regolamento Delegato UE n.244/2012)

²⁷ Cit. da Ministro dello Sviluppo Economico (2013):“L'Italia ha applicato la metodologia comparativa coerentemente ai dettami del Regolamento N. 244/2012, pur mantenendo forti perplessità riguardo ad alcune scelte operate dalla Commissione. In particolare i dubbi del nostro Paese riguardano:

1. l'ipotesi che le valutazioni tecnico-economiche degli interventi di efficienza energetica per gli edifici esistenti siano svolte esclusivamente in presenza di una finestra di opportunità, ovvero contestualmente a opere di manutenzione straordinaria necessarie per la funzionalità, la sicurezza e il decoro dell'edificio;

3.3.1 Prezzi dei vettori energetici

I costi dei vettori energetici da utilizzare nel calcolo sono un parametro particolarmente importante in quanto influenzano tutta l'analisi economica e conseguentemente le tipologie di intervento. I vettori energetici considerati per la presente ricerca sono il gas metano per la produzione di energia termica e l'energia elettrica per il funzionamento dei sistemi di raffrescamento e per l'alimentazione degli ausiliari del sistema di riscaldamento. In particolare, per quanto riguarda il gas metano, i fabbisogni di energia termica uscenti dalla simulazione, espressi in kWh/m², sono stati convertiti²⁸

[...] Come è ben chiaro alla Commissione che l'ha proposta, per le valutazioni economiche degli interventi su edifici esistenti, l'ipotesi al punto 1 sottende una determinazione dei costi limitata al semplice intervento di efficienza energetica e non comprende i costi a esso connessi, dando per scontato che un intervento di ristrutturazione vada comunque realizzato. Questa assunzione riduce drasticamente il costo di investimento e rende particolarmente convenienti interventi che, svolti al di fuori di questa ipotesi, potrebbero non ripagarsi neanche nell'arco della vita utile dell'edificio. Di fatto, una valutazione economica con queste condizioni di partenza fornisce risultati molto vicini a quelli delle analoghe analisi per gli edifici nuovi. A nostro parere questo modo di operare porta alla determinazione di requisiti ottimali che tali non sono. Peraltro, con valori così determinati non si creano le premesse per dare informazioni corrette ai cittadini che potrebbero essere indotti a intraprendere iniziative diseconomiche. Si ricorda che attraverso i diversi canali e strumenti di comunicazione, tra cui l'attestato di prestazione energetica, si suggeriscono ai cittadini interventi di efficienza energetica sugli edifici esistenti e che i requisiti predetti costituiscono un minimo obbligatorio in caso di realizzazione dei lavori. A titolo esemplificativo, nell'ipotesi assunta dalla Commissione, le opere che non concorrono alla determinazione del costo di un intervento di coibentazione esterna di un edificio sono le seguenti: ponteggi, occupazione di suolo pubblico, rimozione e riposizionamento di impianti in facciata (per lo smaltimento delle acque meteoriche, telefonici, elettrici, gas, ..), operazioni di rimozione e/o ripristino di parti superficiali dell'intonaco ammalorate, l'adeguamento dei punti di appoggio in facciata legati alla presenza di sistemi oscuranti, persiane o ante, la revisione dei davanzali e il trasporto in discarica di materiali di risulta. Tener conto anche dei costi connessi a tutte queste opere raddoppia (circa) il costo attribuibile al solo intervento di coibentazione esterna di un edificio e porta alla definizione di requisiti tecnico - economici ottimali ben diversi da quelli che sono determinati nell'ipotesi assunta dalla Commissione".

²⁸ Il fattore di conversione impiegato è pari a 9,423 kWh/ Sm³ (Ente Nazionale Italiano di Unificazione - UNI, 2014b) considerando che 1 Nm³ = 1.0549 Sm³

per ottenere i corrispondenti consumi annui espressi in metri cubi standard ²⁹(Sm³), unità di misura per la tariffazione del combustibile.

Le tariffe sono desunte dai dati forniti dall'Autorità per l'energia elettrica il gas e il sistema idrico (AEEG) applicando per entrambe i vettori i prezzi relativi al mercato tutelato, alternativo al libero mercato e caratterizzato da prezzi fissati dall'AEEG. Tale scelta è giustificata, oltre dalla necessità di avere un riferimento univoco per la definizione dei costi energetici, dal fatto che per quanto riguarda il settore residenziale l'energia erogata nel mercato tutelato, seppur in calo tendenziale da alcuni anni, risulta ancora maggioritaria rispetto alla quota erogata nel mercato libero. In particolare nel 2015 il mercato tutelato rappresenta il 64% del totale, per l'energia elettrica, e il 60% per il gas (Autorità per l'energia elettrica, il gas ed il servizio idrico - AEEGSI, 2016). I prezzi considerati nella presente ricerca fanno riferimento ai profili tariffari destinati alle utenze di tipo domestico del primo trimestre 2016. A questi sono state aggiunte le imposte, le accise e le addizionali regionali applicate in Toscana.

Per quanto riguarda l'energia elettrica si sono considerate le tariffe applicate per utenze con potenza erogata di 3 kW con tariffazione bioraria³⁰, ad eccezione dei casi in cui si analizzano interventi di riqualificazione che prevedono l'installazione di un impianto di riscaldamento con pompe di calore ad espansione diretta, alimentato esclusivamente da elettricità³¹. Le suddette tariffe sono riportate nella Tabella 3-3 e nella Tabella 3-4.

²⁹ Quantità di gas contenuta in un metro cubo di volume alla temperatura di 15 °C e alla pressione atmosferica (1013,25 mbar)

³⁰ La fascia F1 si estende dalle 8 alle 19 nei giorni dal lunedì al venerdì, escluse le festività nazionali; la fascia F2-3 dalle 19 alle 8 nei giorni dal lunedì al venerdì e tutte le ore dei giorni di sabato, domenica e festività nazionali.

³¹ “Dal 1 luglio 2014 l'Autorità ha introdotto la nuova tariffa "D1", che potrà essere applicata, a livello sperimentale e su base volontaria, ai soli clienti domestici che riscaldano la propria casa utilizzando esclusivamente pompe di calore elettriche. Si tratta dunque di una tariffa di rete dedicata per ora solo a clienti domestici caratterizzati da un alto livello di efficienza energetica e che risulta più aderente agli effettivi costi dei servizi di rete. La nuova tariffa prevede che il prezzo di ogni kWh consumato sia costante, cioè indipendente dai consumi annui totali, e potrà essere applicata alle forniture di energia elettrica con contratti sia di mercato libero sia di maggior tutela per l'abitazione di residenza. Tale intervento tariffario potrà ridurre significativamente i costi di esercizio delle pompe di calore ed è finalizzato ad obiettivi generali di allineamento delle tariffe ai costi, utilizzo razionale delle risorse e

Tabella 3-3 - Energia elettrica. Condizioni economiche (al netto delle imposte) per abitazioni di residenza anagrafica con potenza impegnata fino a 3 kW (tariffa D2)

1 gennaio - 31 marzo 2016	Materia energia			Trasporto e gestione del contatore	Oneri di sistema
	Monorario	Biorario			
Quota energia (euro/kWh)	<i>fascia unica</i>	<i>fascia F1</i>	<i>fascia F2-3</i>		
kWh/anno: da 0 a 1800	0.07070	0.07614	0.06801	0.00716	0.039332
da 1801 a 2640	0.07882	0.08426	0.07613	0.03266	0.057932
oltre 2640	0.09040	0.09584	0.08771	0.06908	0.082982
Quota fissa (euro/anno)	28.2236			14.4012	-
Quota potenza (euro/kW/anno)	-			10.0565	-

Tabella 3-4 - Energia elettrica. Condizioni economiche (al netto delle imposte) per abitazioni di residenza anagrafica con pompe di calore elettriche come unico sistema di riscaldamento (“tariffa D1”)

1 gennaio - 31 marzo 2016	Materia energia			Trasporto e gestione del contatore	Oneri di sistema *
	Monorario	Biorario			
	<i>fascia unica</i>	<i>fascia F1</i>	<i>fascia F2-3</i>		
Quota energia (euro/kWh)	---	0.07450	0.06637	0.01857	0.073852
Quota fissa (euro/anno)	40.8631			19.3092	27.85
Quota potenza (euro/kW/anno)	-			15.4612	-

In considerazione del fatto che la tariffa D2 prevede un costo al kWh crescente in funzione del consumo annuo, al fine di stimare correttamente i soli costi per l’energia elettrica connessi con i servizi di climatizzazione analizzati, si è attribuita una quota fissa del consumo annuo, per l’illuminazione ed elettrodomestici, pari a 2700 kWh³².

Per quanto riguarda il gas naturale, i prezzi per utenze domestiche al netto delle imposte, accise e addizionali, usati nella ricerca sono riportati nella Tabella 3-5. Anche in questo caso, come per l’energia elettrica, al fine di stimare correttamente i soli costi connessi alla climatizzazione, individuando gli appropriati scaglioni di prezzo, è stato necessario attribuire una quota fissa di consumo annuo alla cottura dei cibi, pari a 80 Sm³. Tale valore è stato assunto uguale a quello usato nell’applicazione nazionale della metodologia di calcolo per la determinazione dei requisiti minimi di prestazione energetica degli edifici (Ministero dello Sviluppo Economico, 2013) e risulta coerente

promozione delle iniziative di efficienza energetica e sviluppo delle fonti rinnovabili.” (Da: <http://www.autorita.energia.it/it/pompedicalore.htm>)

³² Consumo medio annuo di una famiglia tipo con potenza impegnata pari a 3 kW (fonte: AEEGSI)

rispetto alle indicazioni derivanti dalla norma tecnica UNI/TS 11300-2:2008 (Ente Nazionale Italiano di Unificazione - UNI, 2008a).

Tabella 3-5 – Gas metano. Condizioni economiche per le utenze domestiche con Servizio di tutela

Utenze domestiche Ambito centrale 1 gennaio - 31 marzo 2016	Materia gas naturale	Trasporto e gestione del contatore	Oneri di sistema
Quota energia (euro/smc) consumo Smc/anno: da 0 a 120 da 121 a 480 da 481 a 1.560 da 1.561 a 5.000 da 5.001 a 80.000 da 80.001 a 200.000	0.279364	0.056207 0.142305 0.135010 0.135342 0.115337 0.086159	0.012876 0.050476 0.034576 0.030176 0.024876 0.017076
Quota fissa (euro/anno) portata contatore: classe fino a G6 * classe da G10 a G40 classe oltre G40	58.83	54.08 310.19 985.28	-27.01
* Le utenze domestiche sono normalmente dotate di contatori di classe fino a G6			

Al fine di includere nel calcolo del costo globale una stima dell'incremento dei prezzi dei vettori energetici nel tempo (Ministero dello Sviluppo Economico, 2013) sono assunte le tendenze indicate nel regolamento di riferimento (Commissione Europea, 2012) e derivanti dalle previsioni effettuate nel 2009 della Commissione Europea fino al 2030 (Capros et al., 2010). Questo studio (*Reference Scenario 2009*) prevede per le residenze un aumento annuo del costo del gas del 2,8% e un aumento del costo dell'elettricità dell'1,95% dal 2015 al 2020, dell'1,22% dal 2020 al 2025 e dello 0,10% dal 2025 al 2030. Tali tendenze, come previsto dal regolamento, sono state estrapolate oltre il 2030 fino al termine del periodo di calcolo. Gli scenari di prezzo derivanti dal *Reference Scenario 2009* si basano su un prezzo del petrolio futuro più elevato rispetto alle precedenti simulazioni di scenario risalenti al 2003, 2005 e 2007.

Al momento della stesura della presente ricerca la Commissione Europea ha pubblicato due aggiornamenti dell'analisi presa a riferimento dal regolamento europeo: una nel 2013 e l'ultima nel 2016 (E3M-Lab, 2016). Da quest'ultimo rapporto (*Reference Scenario 2016*) sono stati desunti gli aumenti percentuali del prezzo del gas e dell'energia elettrica dal 2015 al 2050 riportati nella Tabella 3-6. I valori relativi all'ultimo periodo sono stati estrapolati dal 2050 fino al termine del periodo di calcolo.

Tabella 3-6 – Variazioni percentuali dei prezzi del gas e dell’energia elettrica secondo “EU Reference Scenario 2016” (E3M-Lab, 2016)

Periodo	Gas (%)	Energia elettrica (%)
2016-2020	3.4%	1.5%
2021-2025	2.9%	0.6%
2026-2030	1.6%	0.3%
2031-2035	1.8%	0.4%
2036-2040	0.5%	-0.1%
2041-2045	0.5%	-0.4%
2046-2050	0.3%	-0.3%

Le previsioni mostrano un aumento dei prezzi molto più contenuto di quello previsto nel 2009 ed impiegato per la determinazione dei requisiti minimi di efficienza energetica (Ministero dello Sviluppo Economico, 2013). In considerazione di queste differenze si adottano i due scenari di evoluzione dei prezzi dei vettori energetici elencati di seguito e riportati nella Figura 3-14:

1. REF 2009, scenario di riferimento del Regolamento UE 244/2012, caratterizzato da prezzi del gas in costante aumento e prezzi dell’energia elettrica in rapida stabilizzazione (incremento del prezzo vettori energetici elevato);
2. REF 2016, scenario aggiornato, caratterizzato da un progressiva riduzione dell’incremento annuo dei prezzi energetici (incremento del prezzo dei vettori energetici moderato).

In ogni caso è opportuno precisare come la previsione delle tendenze di variazione dei prezzi futuri dei vettori energetici sia caratterizzata da un ampio margine di incertezza. Nella Figura 3-15 si riporta, a titolo di esempio, un’immagine estratta dal *Reference Scenario 2016* in cui sono confrontate le previsioni 2013 (linea puntinata) e 2016 (linea continua) degli andamenti dei prezzi delle fonti energetiche fossili primarie.

L’immagine testimonia come anche i modelli di previsione più complessi non siano in grado di prevedere variazioni significative e repentine come quelle registrate fra il 2015 e il 2016.

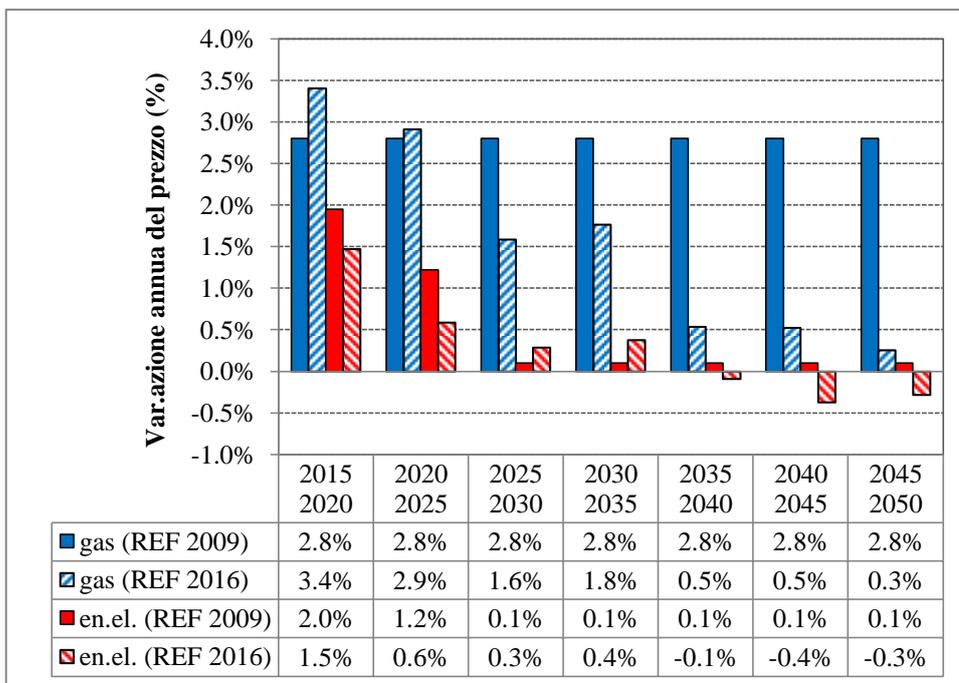


Figura 3-14 – Tassi percentuali di variazione annua dei prezzi del gas e dell'energia elettrica impiegati nel presente studio

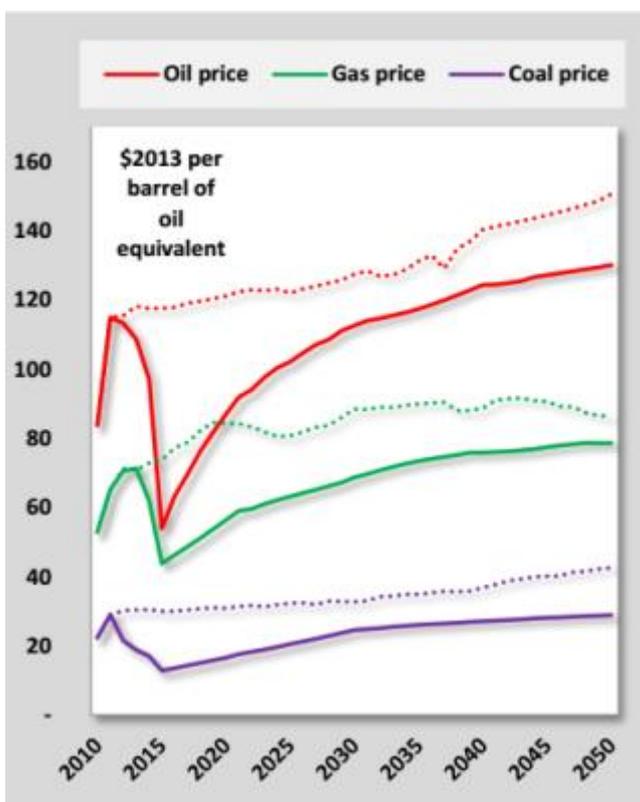


Figura 3-15 – Prezzi dei combustibili fossili (E3M-Lab, 2016)

4 La definizione degli edifici-tipo

Il patrimonio edilizio residenziale nazionale, come descritto nello specifico nel seguito del capitolo è formato per la maggior parte (circa il 70%) da edifici costruiti fra il dopoguerra e la fine degli anni novanta e che circa il 60% degli edifici esistenti in Italia sono stati costruiti precedentemente all'emanazione della prima legge (Legge 373/76) sul risparmio energetico in edilizia (Ministero dello Sviluppo Economico, 2015b).

Gli edifici residenziali multifamiliare costruiti in Italia fra la fine della seconda guerra mondiale e la fine degli anni '70 costituiscono, pertanto, il riferimento applicativo della presente ricerca. Questo patrimonio immobiliare è stato analizzato facendo ricorso al caso di studio costituito dagli edifici residenziali pubblici multifamiliari edificati nel Comune di Pistoia fra il 1945 e il 1978 dallo IACP (Istituto Autonomo Case Popolari) locale nell'ambito dei programmi nazionali INA-Casa e Gescal e dei successivi programmi edificatori. L'edilizia realizzata nel contesto dei suddetti programmi, ha un peso del tutto particolare nel patrimonio abitativo nazionale, sia dal punto di vista quantitativo che della rappresentatività tipologica. Numerosi studi storici evidenziano, infatti, come gli schemi compositivi e distributivi elaborati nell'ambito di questi piani abbiano influenzato profondamente la produzione edilizia residenziale privata, coeva e successiva. In sintesi, il campione di studio scelto è apparso particolarmente interessante per la rappresentatività dei modelli di edificio-tipo che ne derivano rispetto all'intero patrimonio edilizio residenziale nazionale. Ciò ha consentito di assumere tali modelli come elementi esemplificativi di un patrimonio più vasto di quello preso a campione e, quindi, di ampliare gli esiti potenziali della ricerca.

Al fine di avvalorare ulteriormente la rilevanza del caso di studio scelto è, inoltre, significativo richiamare il ruolo guida che la legislazione nazionale ed europea attribuisce al settore residenziale pubblico rispetto al conseguimento degli obiettivi di efficientamento del parco edilizio nazionale (*D. Lgs. 192/2014*, 2014).

Il capitolo descrive il metodo e i risultati della fasi di analisi necessarie per la definizione dei modelli di edifici-tipo impiegati nella ricerca:

- L'analisi dei dati statistici relativi alla composizione tipologica, tecnologica, manutentiva del parco edilizio residenziale nazionale e locale, nonché ai relativi consumi energetici storici;
- L'analisi storica, mediante consultazione di documenti originali e di successivi lavori di ricerca, dell'evoluzione tipologica e tecnologica della produzione

edilizia residenziale pubblica negli anni 1945-1978, con particolare attenzione a quanto realizzato nell'ambito dei piani di ricostruzione post-bellica INA-Casa e Gescal;

- Censimento ed analisi delle caratteristiche tipologiche, costruttive ed energetiche di 145 edifici di edilizia residenziale pubblica costruiti dallo IACP di Pistoia fra il 1945 e il 1978. Lo studio del campione di riferimento si è avvalso della documentazione catastale, della documentazione tecnico-costruttiva storica dell'archivio IACP di Pistoia, dei database cartografici GIS (Geographical Information System) della Regione Toscana e dell'elaborazione dei rilevamenti fotografici;
- Analisi statistica dei principali parametri geometrici, tipologici ed energetici del patrimonio edilizio censito e conseguente suddivisione dello stesso in sei classi omogenee per volume climatizzato ed epoca costruttiva;
- Definizione di un edificio-tipo per ciascuna classe, costruito come modello virtuale (archetipo di riferimento) sulla base delle caratteristiche geometriche e tecnologiche statisticamente rappresentative della classe di appartenenza³³. L'insieme degli edifici tipo così definiti costituisce la Matrice Tipologica di riferimento per il presente lavoro.

4.1 Consistenza e caratteristiche tipologiche e tecnologiche del patrimonio edilizio residenziale nazionale e regionale

Ai fini della selezione e classificazione di un campione di edifici sufficientemente rappresentativo del patrimonio edilizio oggetto di analisi e coerente con le finalità della ricerca è stata effettuata un'analisi preliminare dei dati ISTAT del 15° Censimento della popolazione e delle abitazioni 2011 (ISTAT, 2016). In particolare, a supporto di questa fase della ricerca, sono stati raccolti e rielaborati a livello nazionale e regionale (Toscana, assunta come zona di riferimento per rappresentare le zone climatiche "D" e "C") i dati statistici relativi a:

- Distribuzione percentuale degli edifici per destinazione d'uso (Tabella 4-1)

³³ Sono state adottate metodologie di *stock aggregation* consolidate (IEA - ECBCS, 2004) impiegate e validate nel progetto TABULA (Corrado et al., 2014).

- Vetustà del patrimonio edilizio residenziale (Figura 4-2 e Figura 4-3);
- Caratteristiche dimensionali e tipologiche del patrimonio edilizio residenziale (Figura 4-4, Figura 4-5 e Figura 4-6);
- Tipologia costruttiva del patrimonio edilizio residenziale (Figura 4-7);
- Tipologia impiantistica del patrimonio edilizio residenziale (Figura 4-8, Figura 4-9 e Figura 4-10).

Come si può vedere dalla Tabella 4-1 al 2011 in Italia gli edifici residenziali superano i 12 milioni, di cui più di 700'000 collocati in Toscana (circa il 6%).

Le abitazioni in edifici residenziali superano i 31 milioni (31138287) di cui quasi 2 milioni (1915980) in Toscana; di queste più di 23 milioni (23380977) a livello nazionale e più di 1 milione (1372267) a livello regionale sono occupate da persone residenti.

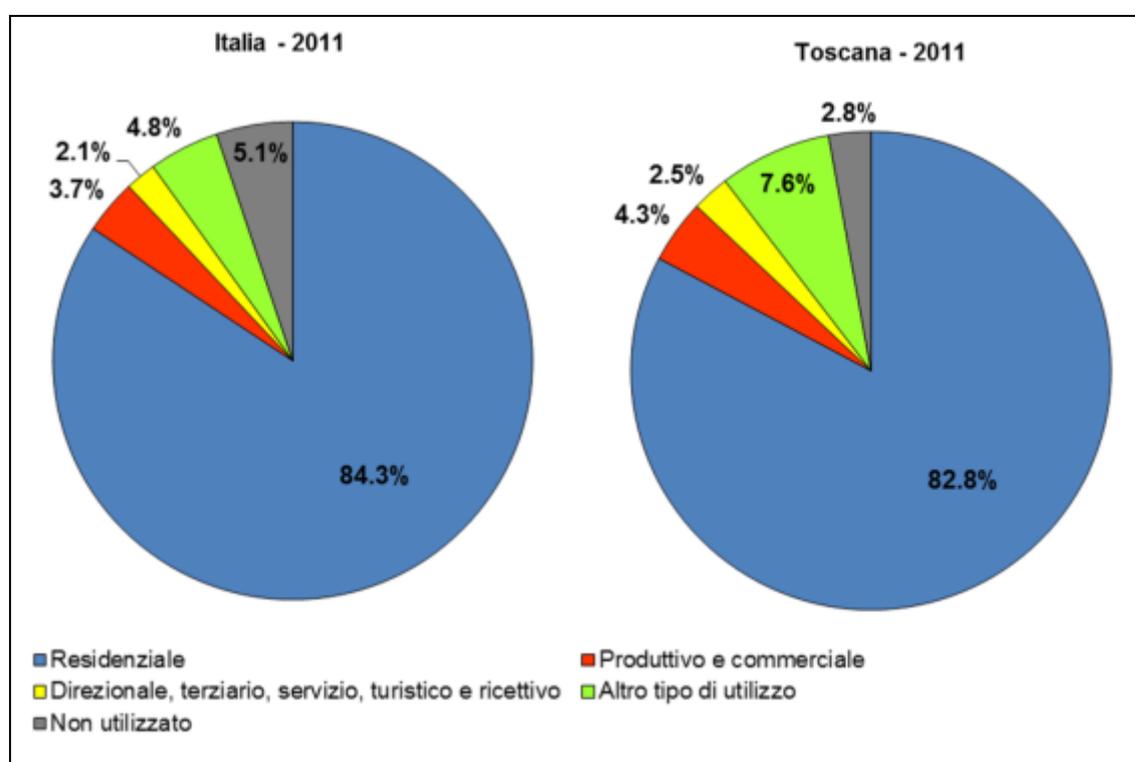


Figura 4-1 - Distribuzione percentuale degli edifici per tipo d'uso al 2011 – Ripartizione territoriale: Italia e Toscana

Tabella 4-1 - Distribuzione degli edifici per tipo d'uso in valore assoluto – Italia e Toscana

	Edifici residenziali	Edifici produttivi e commerciali	Edifici direzionali, per terziario, per servizi, turistici e ricettivi	Edifici con altro tipo di utilizzo	Edifici non utilizzati	<i>Totale</i>
Italia	12'187'698	533'121	300'244	688'182	743'435	14'452'680
Toscana	733'499	38'035	22'340	67'134	25'105	886'113

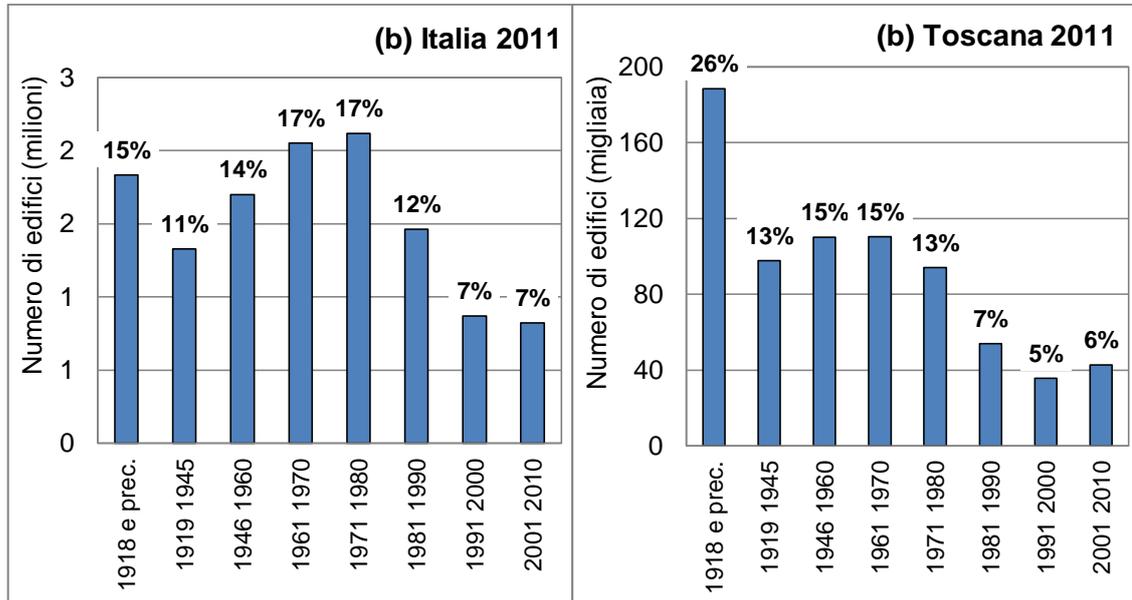


Figura 4-2 - Numero di edifici residenziali per epoca di costruzione. Ripartizione territoriale: Italia (a), Toscana (b)

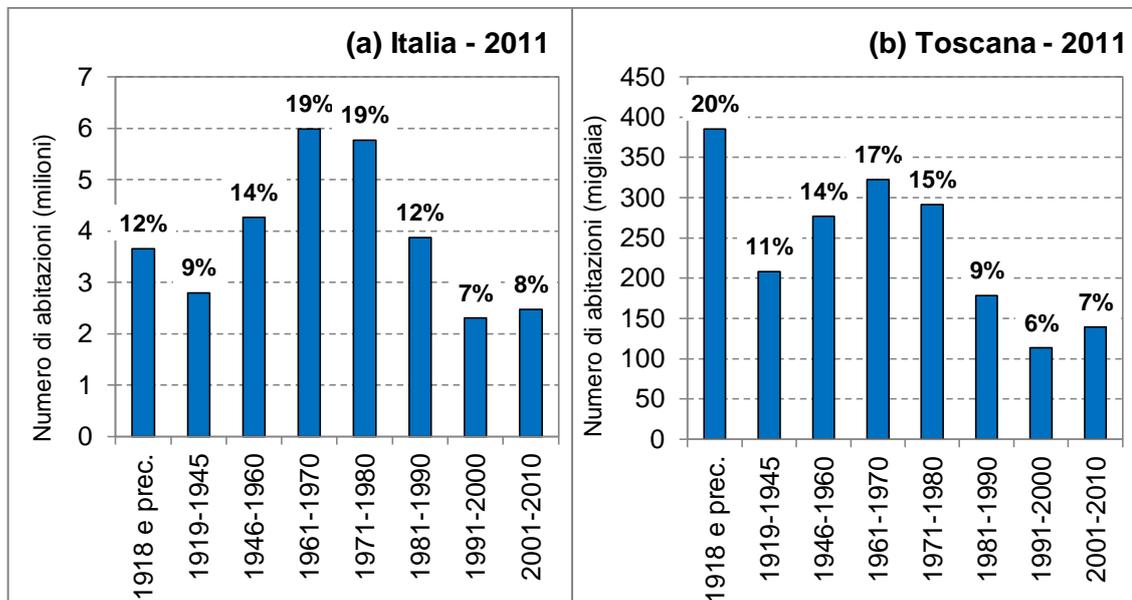


Figura 4-3 - Numero di abitazioni in edifici residenziali per periodo di costruzione - Ripartizione territoriale: Italia (a), Toscana (b)

Dall'analisi della Figura 4-2 e Figura 4-3 si evince come a livello nazionale il maggior numero di edifici e di alloggi con destinazione d'uso residenziale sia stata costruita dal 1946 al 1980 (48% degli edifici e 52% delle abitazioni). A livello regionale escludendo il patrimonio edilizio storico (costruito precedentemente al 1918), che difficilmente può essere oggetto di interventi estensivi di riqualificazione energetica, possono essere tratte le medesime considerazioni. In generale si può notare come a partire dagli anni '80 la produzione edilizia residenziale abbia subito una brusca riduzione, con percentuali relative agli ultimi due decenni inferiori al 10%. Si può quindi concludere che la maggior parte del patrimonio edilizio residenziale nazionale essendo stato costruito precedentemente all'entrata in vigore del DM 10/3/1977, decreto attuativo della Legge 373/1976 (prima legge nazionale sul contenimento del consumo energetico per gli usi termici negli edifici, presenta), se non adeguatamente riqualificato, prestazioni energetiche estremamente scarse, contribuendo in maniera decisiva all'emissione di gas climalteranti.

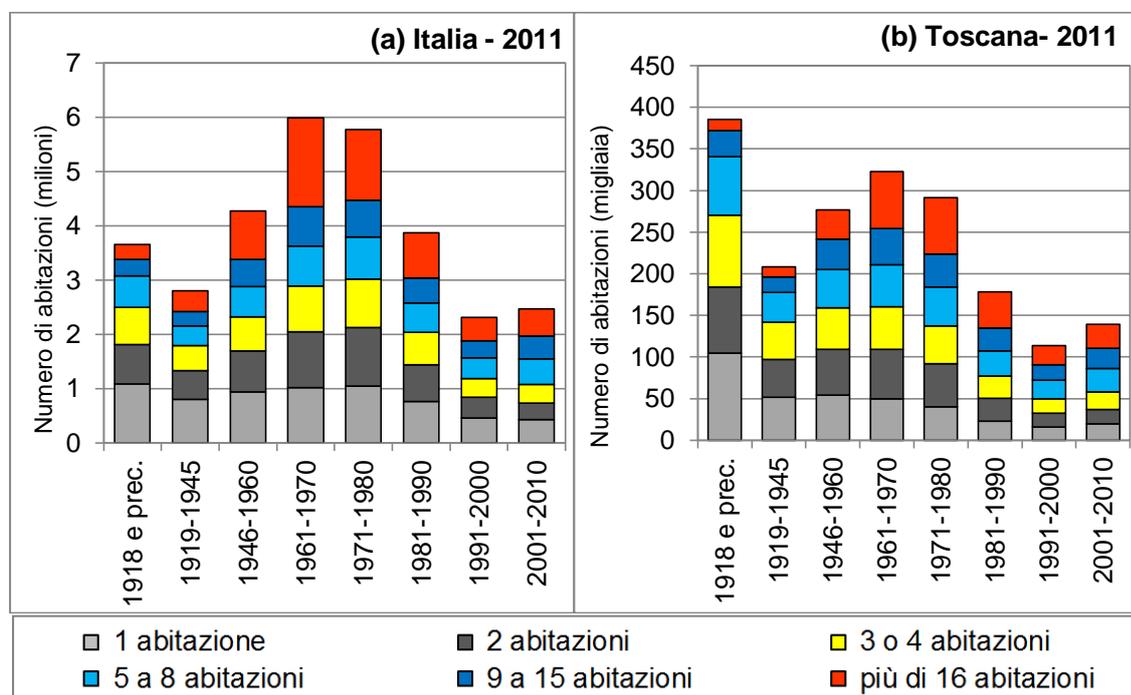


Figura 4-4 - Numero di abitazioni in edifici residenziali per numero di abitazioni presenti nell'edificio suddivise per periodo di costruzione - Ripartizione territoriale: Italia (a), Toscana (b)

Come risulta dai dati statistici ISTAT riassunti in Figura 4-4, l'incidenza sul totale delle abitazioni collocate in edifici plurifamiliari (con 3 o più abitazioni) è del 61% a livello nazionale e del 63% a livello regionale, rispetto al 39% e 37% delle abitazioni in edifici mono o bi-familiari. In particolare nel periodo dal dopoguerra ad oggi le abitazioni

collocate in edifici con 5 o più alloggi rappresentano il 50% del patrimonio edilizio nazionale e il 53% del patrimonio edilizio regionale. Tali dati che indicano per l'Italia una bassa diffusione degli edifici mono e bi-familiari a favore di quelli plurifamiliari (Birchall et al., 2014) sono confermati dalla Figura 4-5 che mette in evidenza come la maggior parte degli edifici residenziali del patrimonio nazionale e regionale abbiano 2 o più piani e 1 o più scale comuni. E' necessario interpretare la Figura 4-5 considerando che essendovi enumerati gli edifici e non gli alloggi, l'incidenza percentuale delle abitazioni collocate in edifici con 3 o 4 piani fuori terra sul totale delle abitazioni è nettamente maggiore di quella mostrata in figura.

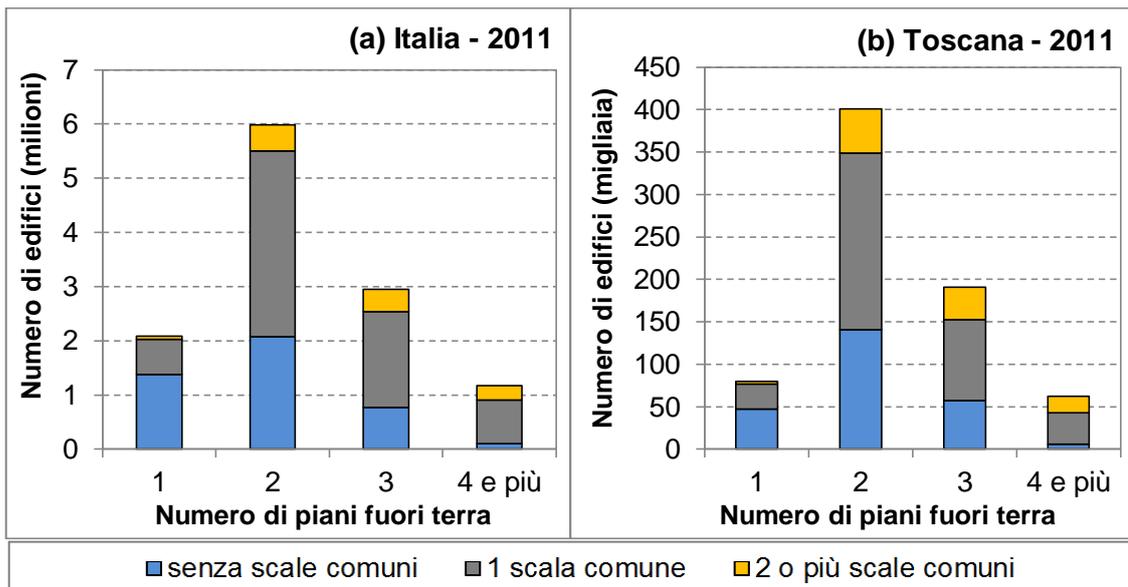


Figura 4-5 – Edifici residenziali per numero di piani fuori terra e numero di scale comuni. Ripartizione territoriale: Italia (a) e Toscana (b)

Dai dati suddetti si evince indirettamente che le tipologie edilizie in linea multipiano sono tra le più diffuse come si illustrerà anche in seguito nel paragrafo 4.3.1.

Gli alloggi occupati da persone residenti con superficie utile compresa 60 a 99 m² costituiscono il 47% del totale nazionale e il 48% del totale regionale (Figura 4-6). Anche questi dati dimensionali rimandano a tipologie edilizie in linea multipiano (vedi paragrafo 4.3.1)

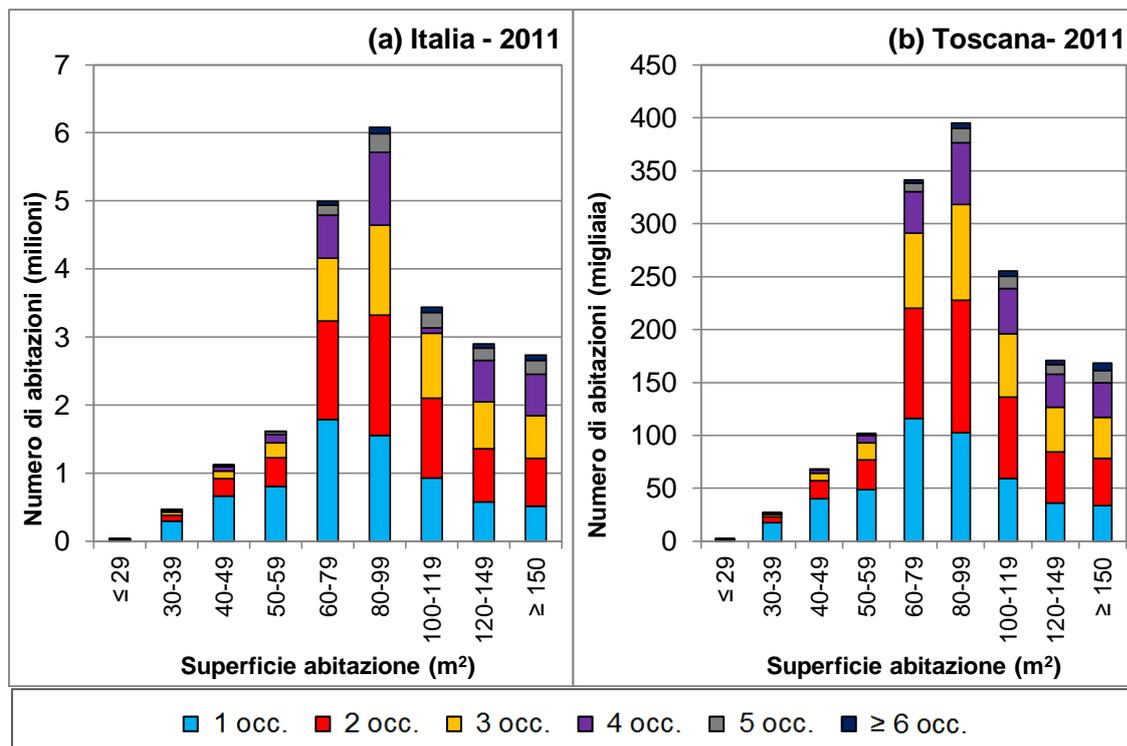


Figura 4-6 - Abitazioni occupate da persone residenti per classe di superficie e numero di occupanti. Ripartizione territoriale: (a) Italia, (b) Toscana

La Figura 4-7 mostra che le costruzioni con struttura portante in calcestruzzo armato cominciano ad affacciarsi nel dopoguerra (18% a livello nazionale e 16% a livello regionale nel periodo 1946-1960) per divenire preponderanti nei decenni successivi, con percentuali superiori al 50% a partire dagli anni '80 (nelle grandi città questa percentuale raggiunge anche il 70%). Limitando l'analisi al periodo 1946-1980, preso a riferimento nel presente lavoro, possiamo vedere come la maggior parte degli edifici realizzati nel periodo 1946-1970 sia costruito con struttura in muratura portante, mentre nel successivo decennio (1971-1980) la tendenza si inverte e la struttura in calcestruzzo armato diventa la soluzione più diffusa a livello nazionale. Nell'ambito delle grandi città, tuttavia, è da rilevare come tale transizione fra tecnologia costruttiva in muratura portante e tecnologia in calcestruzzo armato avvenga con un decennio di anticipo (1960-1961). Anche tale tecnologia costruttiva conferma il successo delle tipologie edilizie multipiano proprie delle case in linea ed a torre.

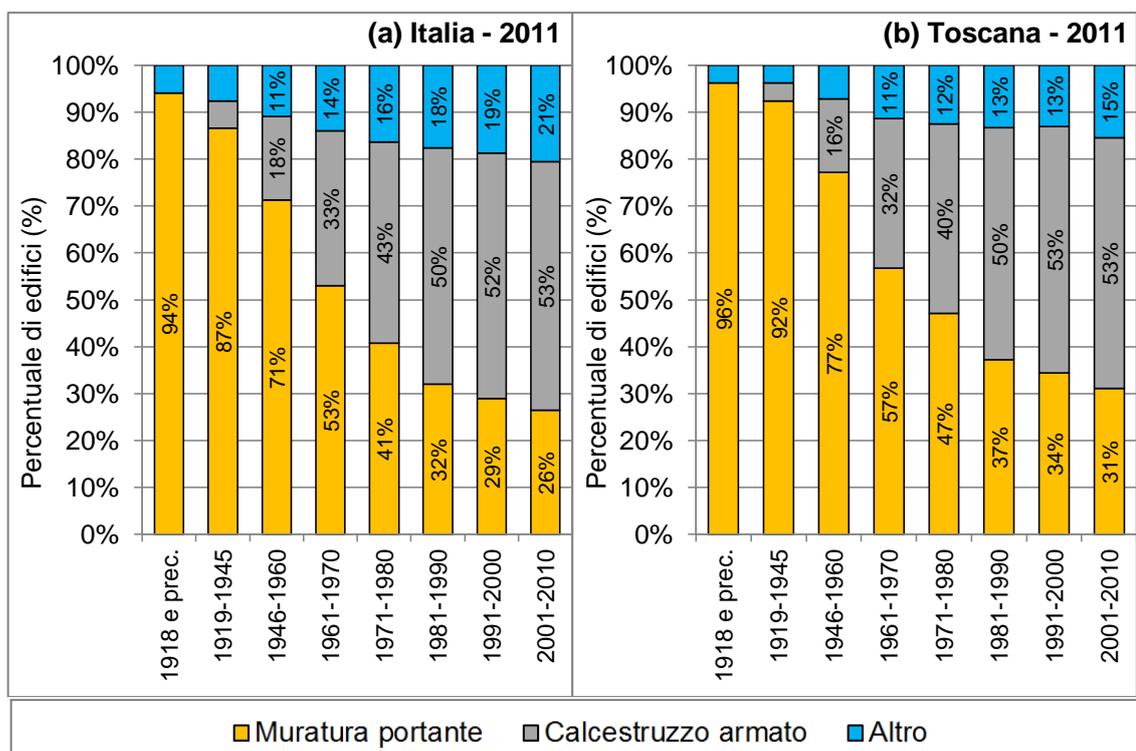


Figura 4-7 - Edifici residenziali per tipologia costruttiva e epoca di costruzione. Ripartizione territoriale: (a) Italia, (b) Toscana.

Nella Figura 4-8 e nella Figura 4-9 è rappresentata la situazione al 2011 a livello nazionale e regionale delle dotazioni impiantistiche per riscaldamento e produzione di acqua calda sanitaria suddivise per tipologia di utilizzazione, dalla quale si evince che l'impianto autonomo con produzione combinata di acqua calda sanitaria domina la scena in entrambi gli ambiti territoriali. La presenza di impianti centralizzati con produzione separata di acqua calda sanitaria mediante bollitore elettrico o generatore a gas dedicato risulta limitata (19% in ambito nazionale e 13% a livello regionale). Nelle grandi città tuttavia tale soluzione presenta una ricorrenza nettamente superiore alla media nazionale (a Firenze ad esempio ammontano al 26% contro il 19%). Gli apparecchi singoli fissi (quali caminetti, i radiatori individuali a gas, le pompe di calore, le piastre elettriche, le stufe a carbone, a legna, a kerosene, a GPL) sono presenti in una piccola percentuale di abitazioni. Stesse considerazioni valgono per il tipo di combustibile utilizzato, dove il gas metano domina su tutte le altre fonti energetiche con oltre il 90% degli impianti serviti (Figura 4-10).

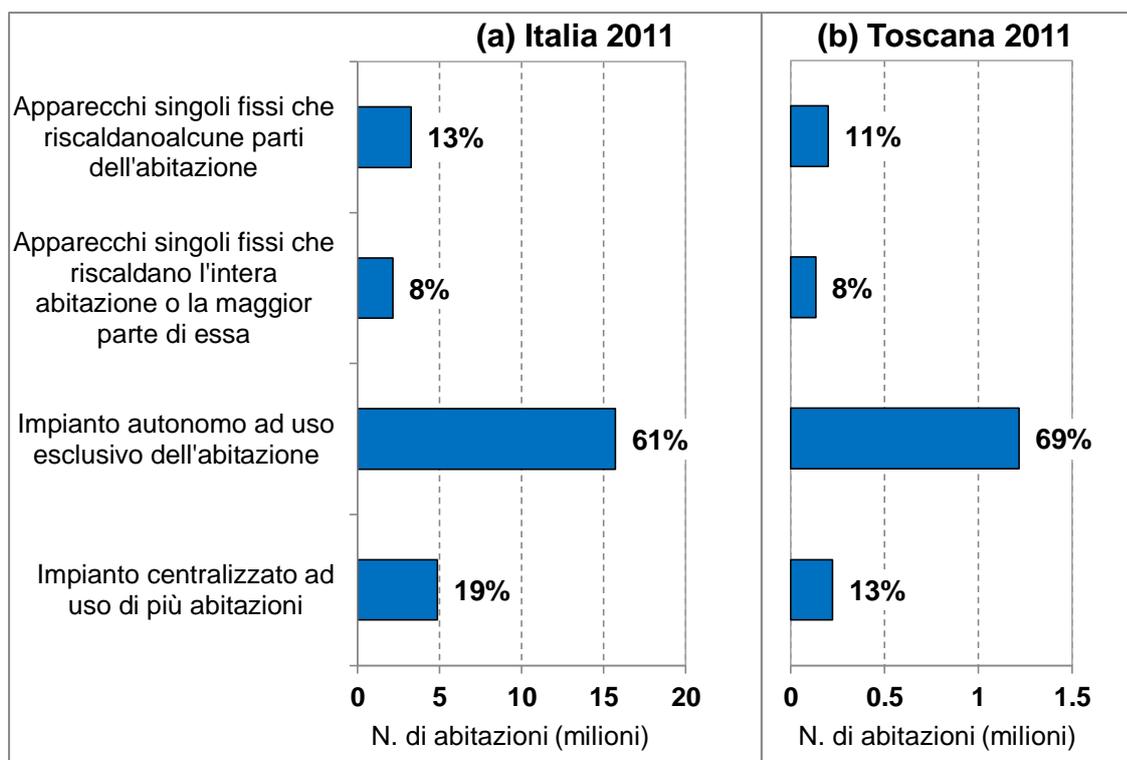


Figura 4-8 - Abitazioni occupate da persone residenti per tipologia di impianto di riscaldamento. Ripartizione territoriale: (a) Italia, (b) Toscana.

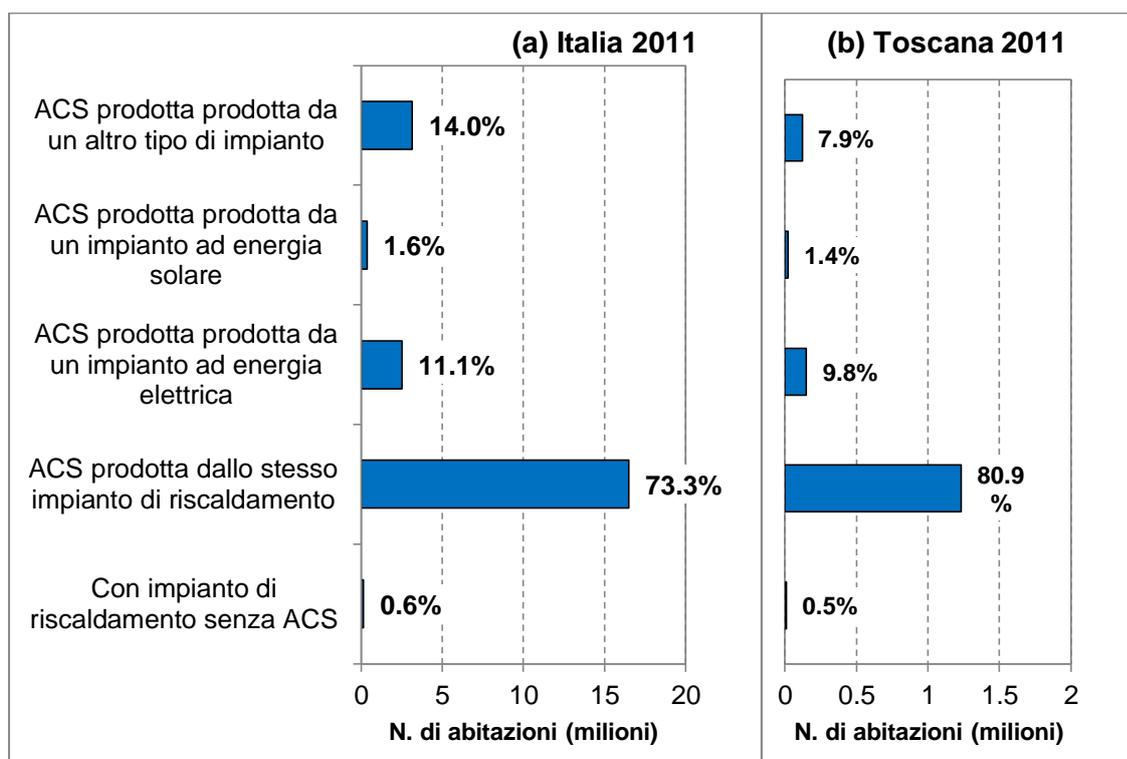


Figura 4-9 - Abitazioni occupate da persone residenti con impianto di riscaldamento per tipo di impianto di ACS. Ripartizione territoriale: (a) Italia, (b) Toscana.

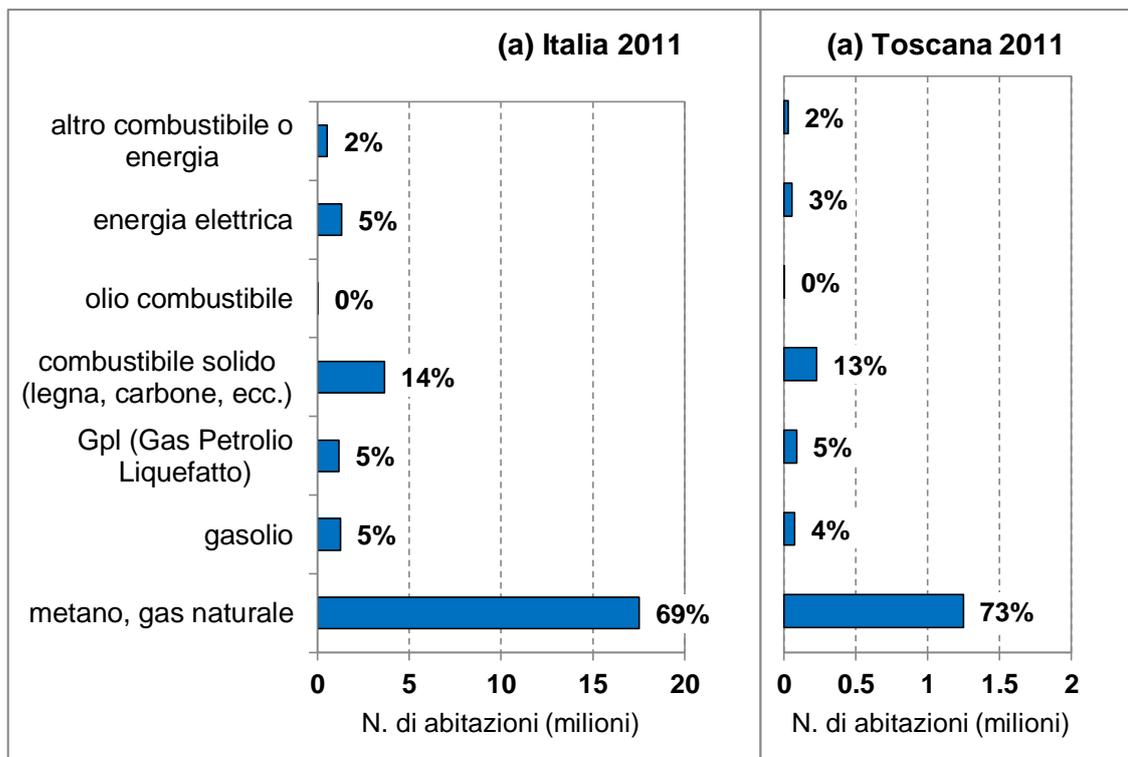


Figura 4-10 - Abitazioni occupate da persone residenti per tipo di combustibile che alimenta l'impianto di riscaldamento. Ripartizione territoriale: (a) Italia, (b) Toscana.

CRESME, nell'attività di approfondimento e integrazione dei dati ISTAT sulla diffusione degli impianti di climatizzazione nelle abitazioni italiane (Toso and Mura, 2014), conferma il gas metano come principale vettore energetico impiegato negli impianti di riscaldamento delle abitazioni italiane (85%) nonché la maggiore diffusione degli impianti autonomi rispetto ai centralizzati (Figura 4-11). In particolare nelle aree geografiche Nord-Est, Centro e Sud la percentuale dei primi supera il 75%.

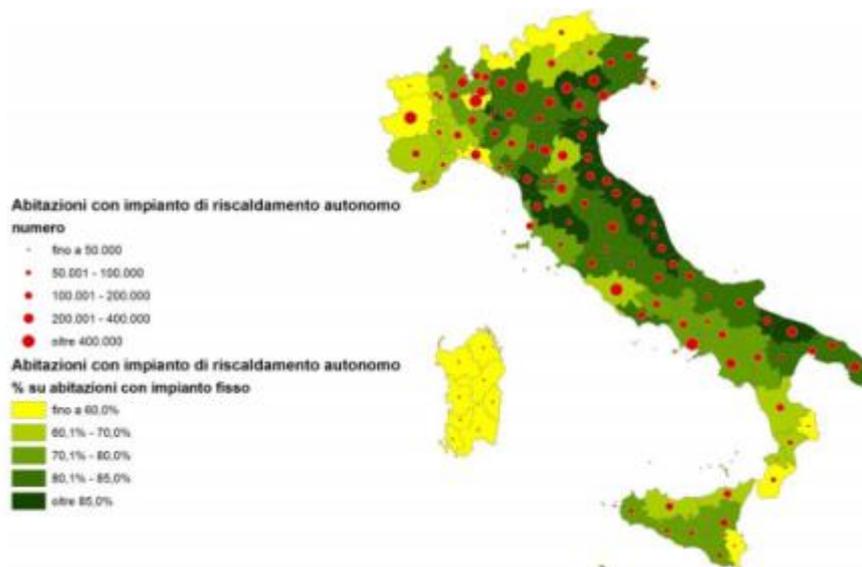


Figura 4-11 – Distribuzione impianti di riscaldamento autonomi per province - elaborazione CRESME su dati ISTAT e Cresme/Si (Toso and Mura, 2014)

La stessa ricerca, sulla base di indagini dirette, analizza nel dettaglio la diffusione delle diverse tipologie di impianti di climatizzazione presenti negli edifici residenziali, confermando la diffusione maggioritaria degli impianti di riscaldamento autonomi ed evidenziando come, a fronte di quali 25000 impianti censiti, più del 30% sia asservito anche od esclusivamente alla funzione di raffrescamento. Di questi la maggior parte (91%) è costituita da impianti autonomi completamente distinti (per generazione, distribuzione ed emissione) dall'impianto di riscaldamento (Figura 4-12).

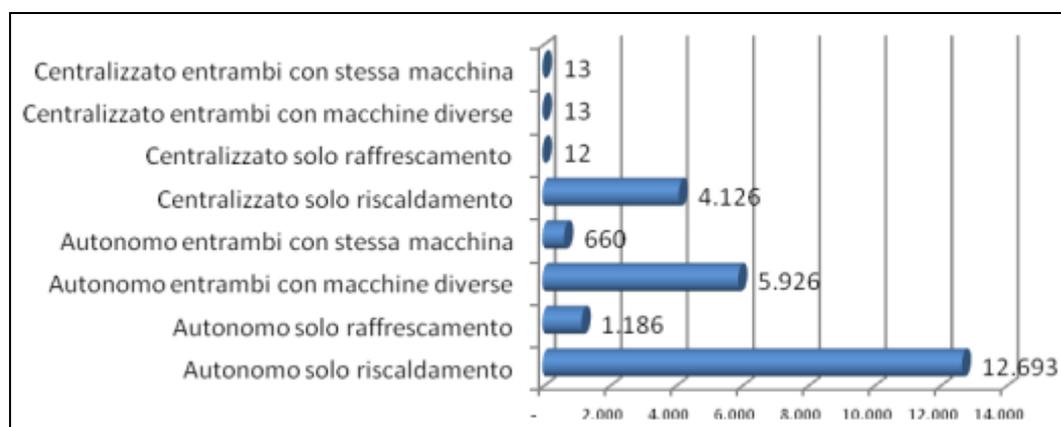


Figura 4-12 - Tipologia di impianto per modalità di climatizzazione (Toso and Mura, 2014)

Come riportato in Figura 4-13, la maggior parte di questi è costituita da “condizionatori” cioè sistemi ad espansione diretta aria-aria tipo monoblocco, split o multi-split.

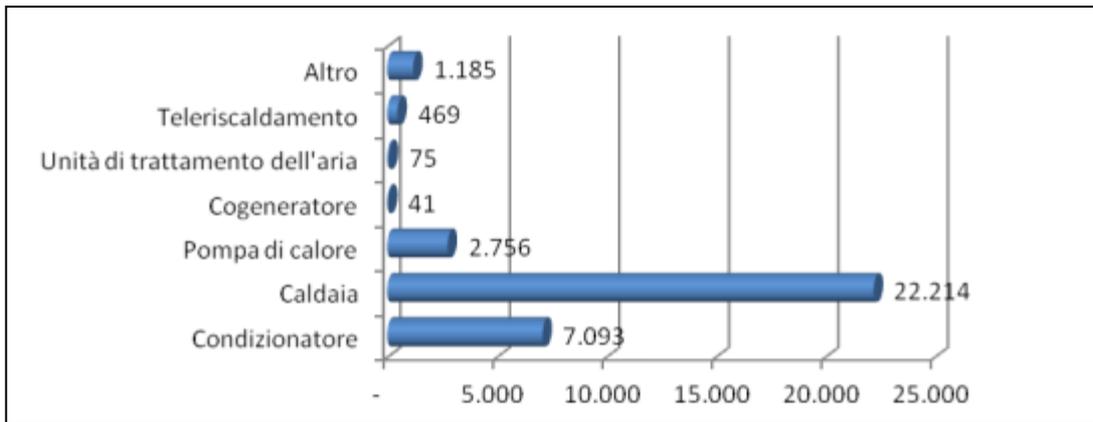


Figura 4-13 - Tipologia di impianto per tecnologia di funzionamento (Toso and Mura, 2014)

Un approfondimento specifico su questa particolare tipologia impiantistica (Figura 4-14) ne evidenzia la grande diffusione nel patrimonio edilizio italiano: quasi 18 milioni di unità moto-condensanti (“unità esterna” contenete il condensatore, il compressore e la valvola di espansione) di cui la maggior parte facenti parte di impianti fissi monosplit funzionati come pompa di calore a ciclo invertibile. Secondo questo studio al 2014, un totale di 7,7 milioni di abitazioni sono dotate di sistemi a pompa di calore aria-aria a ciclo invertibile usate come unico impianto di climatizzazione invernale ed estiva oppure come supporto alla caldaia in inverno e come condizionatore in estate.

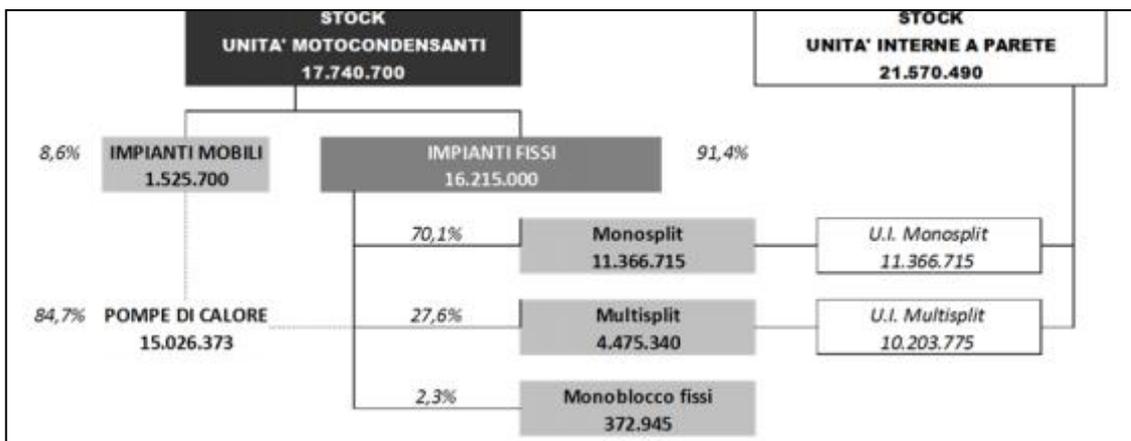


Figura 4-14 - Dotazione impianti di condizionamento autonomi (Toso and Mura, 2014)

4.2 Analisi dei consumi energetici e relazioni con l'andamento climatico

Al fine di individuare possibili correlazioni tra consumi energetici del patrimonio residenziale nazionale e andamenti climatici sono stati analizzati i dati ENEA del Rapporto Energia e Ambiente 2009-2010 (ENEA - Unità Centrale Studi e Strategie, 2012) , i dati EUROSTAT (Eurostat, 2016) e i dati del Progetto Odyssee-Mure (ODYSSEE-MURE Project, 2015).

La Figura 4-15 mostra come a partire dagli anni '70 i consumi energetici finali per gli impieghi industriali si siano progressivamente contratti a favore degli usi civili (residenziale e terziario) e dei trasporti. In particolare a partire dal 2007, in conseguenza della crisi finanziaria ed economica che ha determinato un crollo della produzione industriale, il settore civile è divenuto responsabile di quasi il 40% dei consumi finali nazionali. Questo dato, se considerato insieme al basso tasso di rinnovamento del parco edilizio nazionale, indica nell'incremento dell'efficienza energetica del parco edilizio esistente la strategia primaria per soddisfare gli obblighi internazionali di riduzione delle emissioni climalteranti.

La Figura 4-16 mostra come nel settore civile dal 1971 al 2010 siano aumentati di più di otto volte i consumi di gas, a scapito dei combustibili solidi e del petrolio usati in passato per il riscaldamento, e di quattro volte i consumi di energia elettrica. A livello residenziale (Figura 4-17) la ripartizione dei consumi per funzione d'uso è rimasta sostanzialmente invariata dal 1990 al 2009, con la sola eccezione degli usi elettrici che sono aumentati del 39% con un incremento medio annuo di quasi il 2%. Gli usi elettrici obbligati includono l'illuminazione, gli apparecchi domestici e la climatizzazione estiva in minor misura; considerando che in questo periodo l'efficienza energetica degli elettrodomestici e dell'illuminazione è nettamente aumentata (ad es. lampade a LED, elettrodomestici in classe A ed oltre), si evidenzia che una parte consistente dell'incremento del consumo di energia elettrica sia dovuto alla diffusione della climatizzazione estiva anche in ambito domestico. Nel 2014, infatti, su quasi 25000000 di abitazioni occupate, risultano dotate di impianto di raffrescamento quasi 8000000 unità immobiliari (più del 30%). La maggior parte degli impianti (circa 7000000 pari all'87%) è costituito da condizionatori autonomi ad espansione diretta di piccola taglia (tipo mono-split e multi-split) il cui numero di unità installate in Italia è stimato in più di 16000000 elementi esclusi gli impianti mobili (Toso and Mura, 2014)

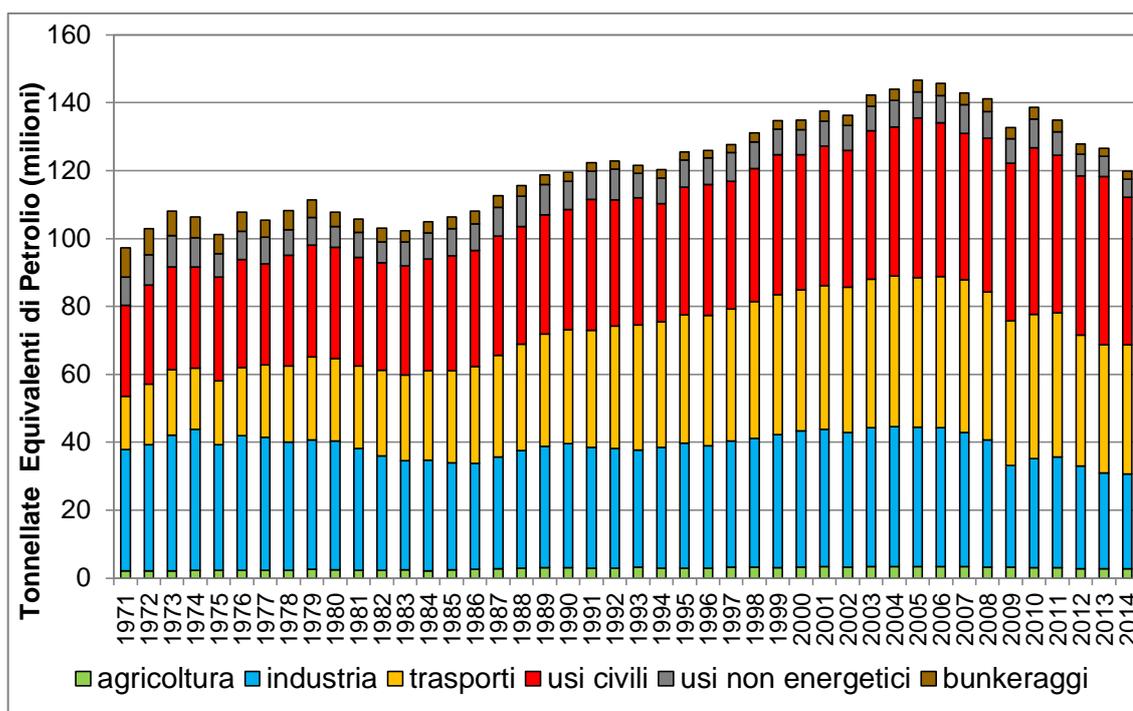


Figura 4-15 - Bilancio energetico. Impieghi finali per anno. Ripartizione territoriale: Italia (Istat data warehouse: <http://dati.istat.it/>).

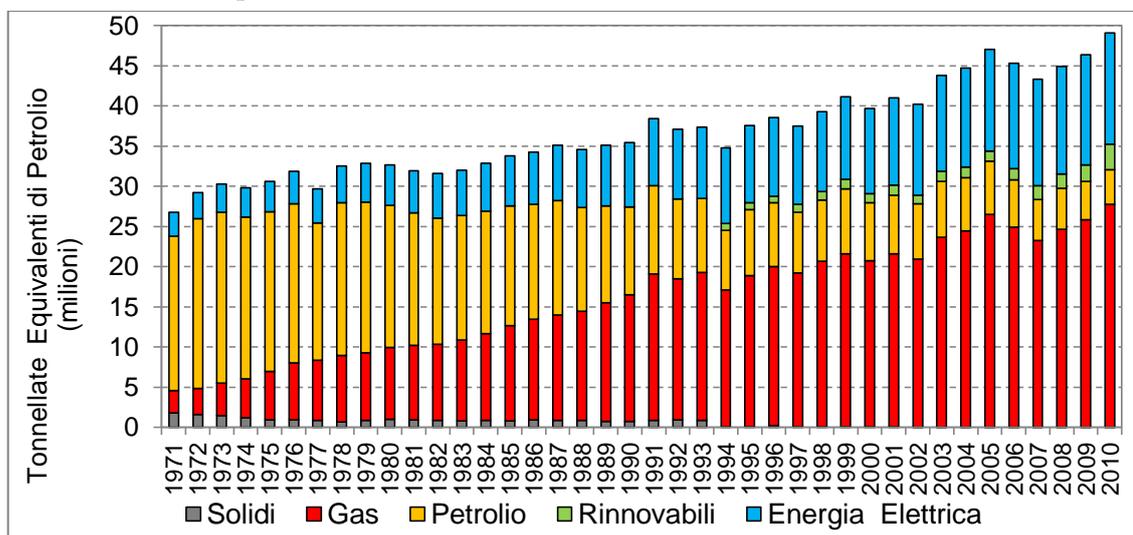


Figura 4-16 - Bilancio energetico nazionale. Impieghi finali per usi civili (residenziale e terziario) per vettore energetico. Ripartizione territoriale: Italia. (ENEA - Unità Centrale Studi e Strategie, 2012)³⁴³⁵

³⁴ I dati riferiti agli usi civili (residenziale e terziario) comprendono i consumi del settore domestico, del commercio, dei servizi e della Pubblica Amministrazione.

³⁵ Dal 1994 le tabelle sono state riviste rispetto agli anni precedenti:

- I combustibili solidi includono anche espansione di gas compresso, gas di acciaieria ad ossigeno e residui di processi chimici;
- E' inclusa l'energia elettrica da biomasse, rifiuti e fotovoltaico;

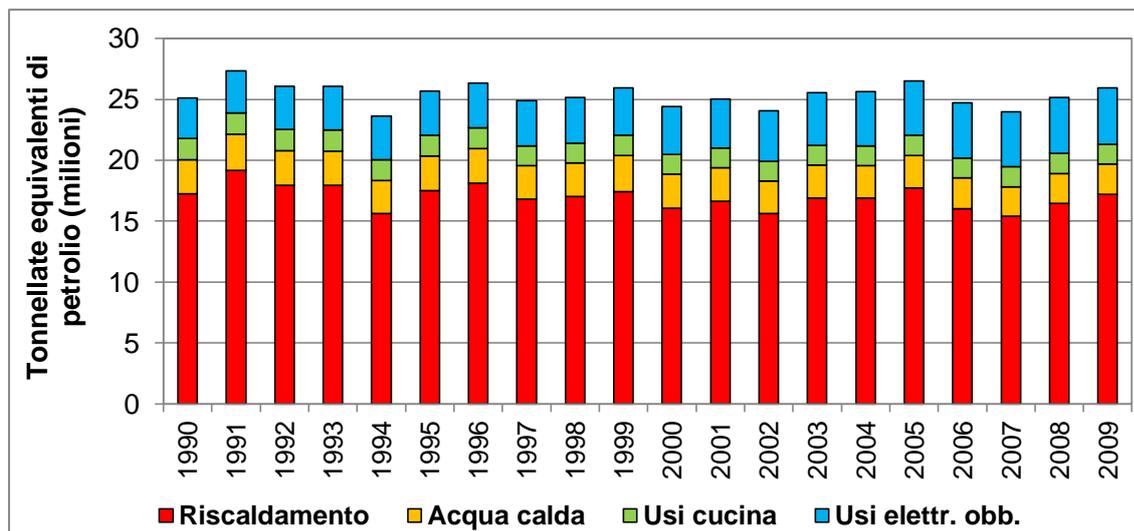


Figura 4-17 - Residenziale. Consumi energetici per funzione d'uso. Ripartizione territoriale: Italia. (ENEA - Unità Centrale Studi e Strategie, 2012)

La Figura 4-18 mettendo a confronto i consumi per la climatizzazione invernale del settore residenziale con un indicatore di severità climatica quale è il numero annuale di gradi giorno³⁶ permette di rilevare la forte influenza delle condizioni climatiche sui consumi energetici per la climatizzazione invernale. In particolare fra i valori analizzati esiste un alto coefficiente di correlazione lineare³⁷ (ρ_{XY}) pari 0,88. Nella figura è riportato inoltre il consumo energetico annuale per riscaldamento destagionalizzato sulla base degli stessi gradi giorno. Osservando l'andamento di quest'ultimo indice si osserva come i consumi si mantengano piuttosto costanti nell'arco del periodo 1990-2012. Non si rilevano peraltro significative variazioni di tendenza in coincidenza con l'introduzione dei dispositivi legislativi atti al contenimento dei consumi energetici degli edifici (legge 10/1991 e D.Lgs 192/2005). Ciò è dovuto al fatto che tali provvedimenti incidono solo sulla prestazione energetica dei nuovi edifici che

- In conformità con altre fonti statistiche è stato adottato per l'energia elettrica, nella parte del bilancio riguardante gli impieghi dell'energia, il coefficiente di conversione di 860 kcal per kWh.

³⁶ I dati relativi ai gradi giorno riportati in figura sono estratti dall'archivio Eurostat e sono calcolati come sommatoria delle differenze fra 18°C e la temperatura media giornaliera, estese a tutti i giorni dell'anno in cui la temperatura media giornaliera risulta inferiore o uguale a 15°C.

³⁷ Indice che misura il grado di relazione lineare tra due variabili (Fonte: Glossario ISTAT - <http://www3.istat.it/servizi/studenti/binariodie/CorsoExcel/Glossario.htm>)

rappresentano solo un minima parte del patrimonio edilizio esistente. Gli edifici costruiti antecedentemente all'entrata in vigore delle suddette normative di fatto esercitano una sorta di "effetto zavorra" che rallenta la riduzione dei consumi energetici del patrimonio edilizio nazionale. Da qui la necessità di intervenire sulla riqualificazione del patrimonio edilizio esistente come asserito nella normative e come asserito letteratura prodotta sull'argomento (Almeida and Ferreira, 2015; Morck et al., 2015; Ministero dello Sviluppo Economico, 2015a, 2015b; *D. Lgs. 192/2014*, 2014; Morck et al., 2016). Le analisi in merito ai consumi energetici per riscaldamento possono, per analogia, essere trasferite ai consumi energetici estivi espressi dai consumi elettrici: ovvero l'aumento delle temperature, specie per edifici con struttura in c.a. dotati di massa termica ridotta e poco isolati, determina la necessità di raffrescamento, necessità indotta anche dall'evoluzione del progresso economico e sociale evidenziata dalla continua diffusione degli apparecchi di raffrescamento autonomi, al cui riguardo, specifici studi prevedono che, nel 2020, il numero di abitazioni servite esclusivamente (raffrescamento e riscaldamento) o in modo complementare rispetto alla caldaia a gas, dagli impianti a pompa di calore invertibile con compressore elettrico cresceranno del 33% (Toso and Mura, 2014).

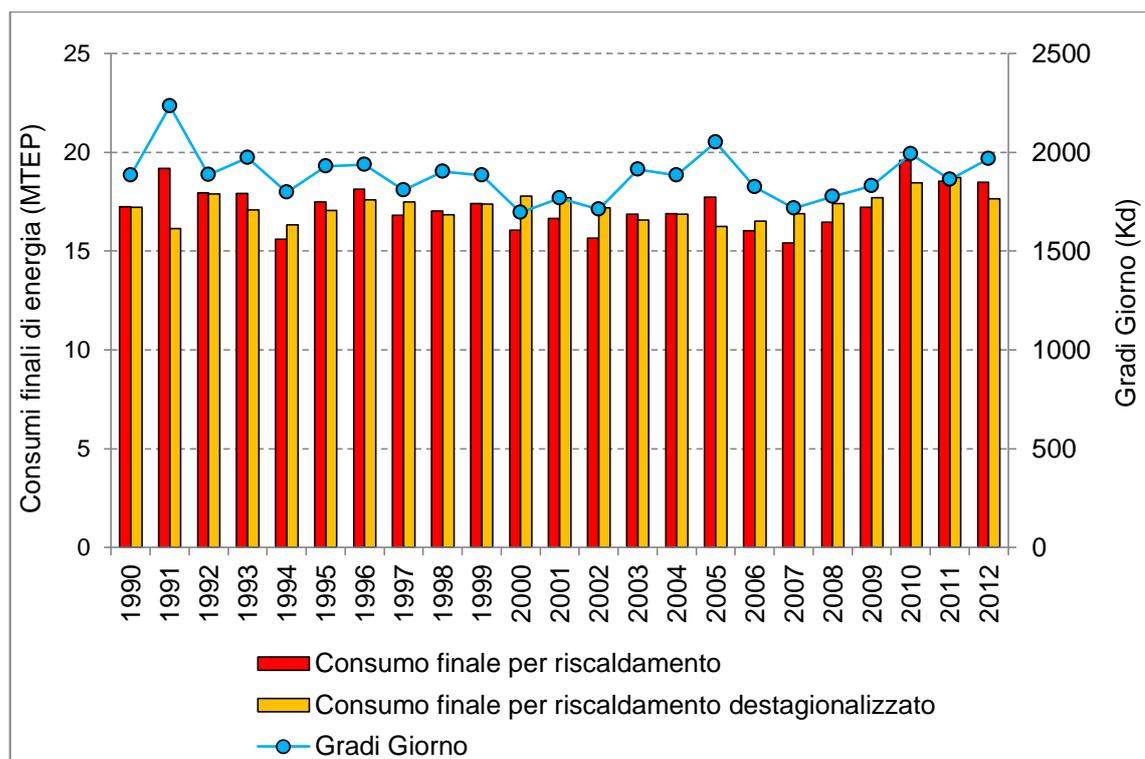


Figura 4-18 - Consumo energetico finale per riscaldamento residenziale, gradi giorno medi nazionali per riscaldamento su base 18°C e consumo per riscaldamento destagionalizzato. Ripartizione territoriale: Italia. (Fonti: ENEA per i consumi fino al 2009 e Eurostat per i gradi giorno e Progetto Odyssee-Mure per i consumi dal 2010 al 2012)

4.3 Analisi storico - tipologica del patrimonio edilizio di riferimento

4.3.1 Il piano INA-CASA

In Italia, nel periodo post-bellico dal 1949 al 1973 sono stati attivati due importanti piani di costruzione di abitazioni di edilizia sociale (INA-CASA dal 1949 al 1963 e Gescal dal 1963 al 1973), proseguito poi fino negli anni '80 (legge 457/1978), molto importanti per i seguenti motivi:

- l'individuazione di tipi edilizi che hanno finito per diventare archetipi di gran parte delle costruzioni residenziali che si sono realizzate in Italia nel dopoguerra (specie la tipologia in linea);
- l'aggregazione a livello urbano (quartieri) di tali tipi, di esempio per l'espansione di molte città.

Il piano INA-CASA "*Piano di incremento occupazione operaia – Case per lavoratori*" già nella sua intitolazione fa capire le esigenze che lo hanno generato, ovvero la necessità da un lato di promuovere l'occupazione e dall'altro di assicurare un alloggio dignitoso a gran parte della popolazione economicamente disagiata in un Paese devastato dalla guerra.

Al fine di soddisfare le suddette esigenze, furono diramate delle precise direttive che trovarono sintesi esemplificativa in specifiche Linee Guida raccolte nel primo settennio in due fascicoli (1949-1950) dove si suggerivano:

- la tecnologia costruttiva, che doveva essere tale da utilizzare materiale largamente disponibile e richiedere il vasto impiego di manodopera non specializzata;
- la tipologia edilizia, che doveva essere semplice ma funzionale sia sotto l'aspetto delle dotazioni dimensionali, igieniche e sanitarie, sia per consentire una rapida attuazione dei piani per semplice aggregazione edilizia e moltiplicazione degli edifici a scala urbana (tipicamente il quartiere periferico e sue proliferazioni). Nelle Figura 4-19 e nella Figura 4-20 sono riportati un estratto delle indicazioni tipologiche (INA-CASA, 1950, 1949) mentre nella Figura 4-21 e nella Figura 4-22 sono riportati esempi delle aggregazioni urbanistiche (INA-CASA, 1950)

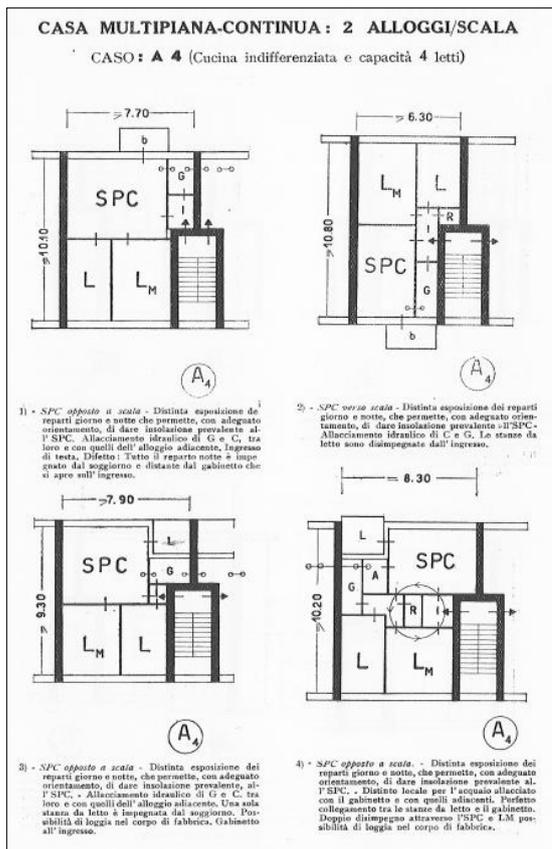


Figura 4-19 - Tipi edilizi in linea (INA-CASA, 1949)

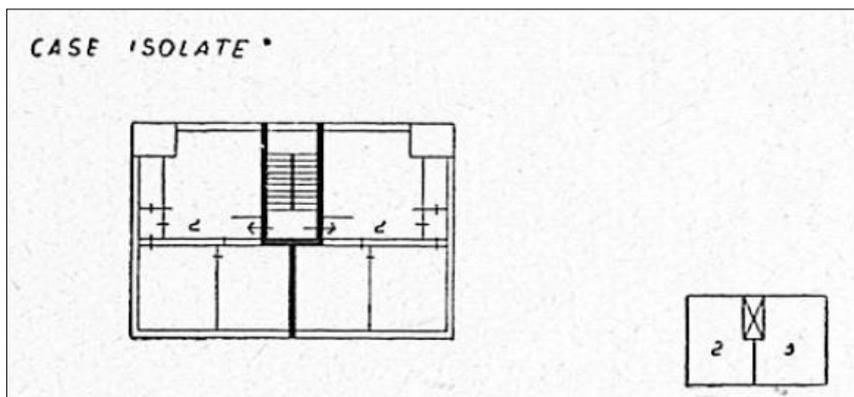


Figura 4-20 - Schema del tipo "isolato" multipiano generatore della tipologia in linea (INA-CASA, 1950)

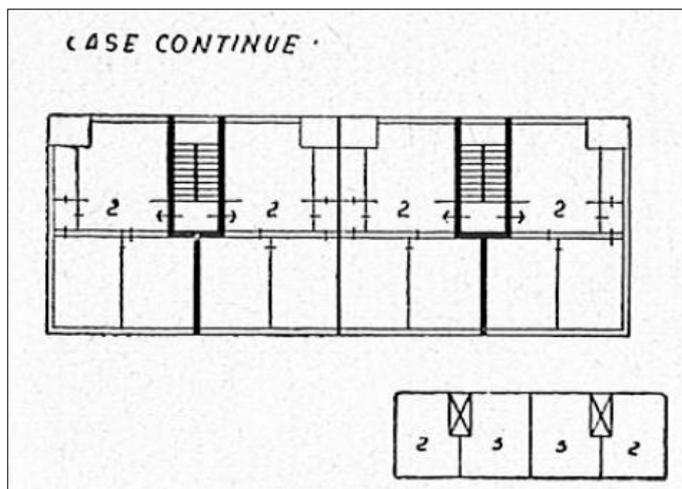


Figura 4-21 - Schema di generazione del tipo "continuo" (INA-CASA, 1950)

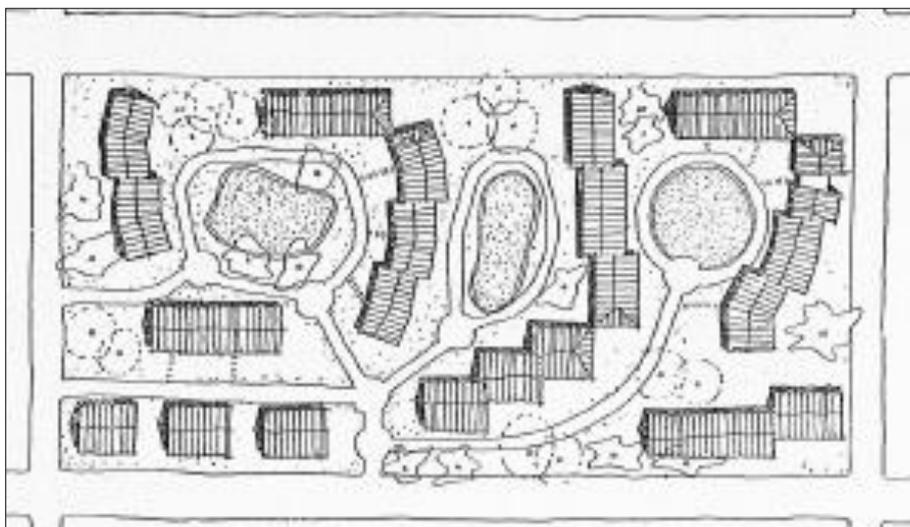


Figura 4-22 - Edifici in linea e relative aggregazioni (INA-CASA, 1950)

Da Figura 4-23 a Figura 4-31 sono riportati esempi delle aggregazioni con tipologia in linea suggerite nella Figura 4-22 e trasposte in realtà, giunte fino ai piani PEEP degli anni '70 -'80.

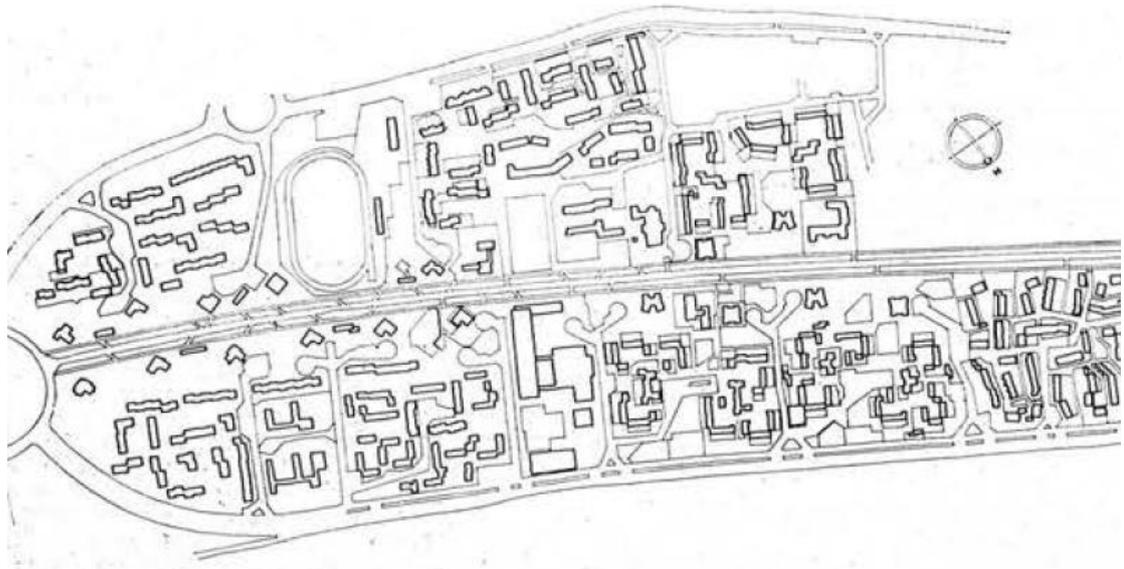


Figura 4-23 - Planimetria del Quartiere S. Giuliano a Mestre (Acocella, 1980)

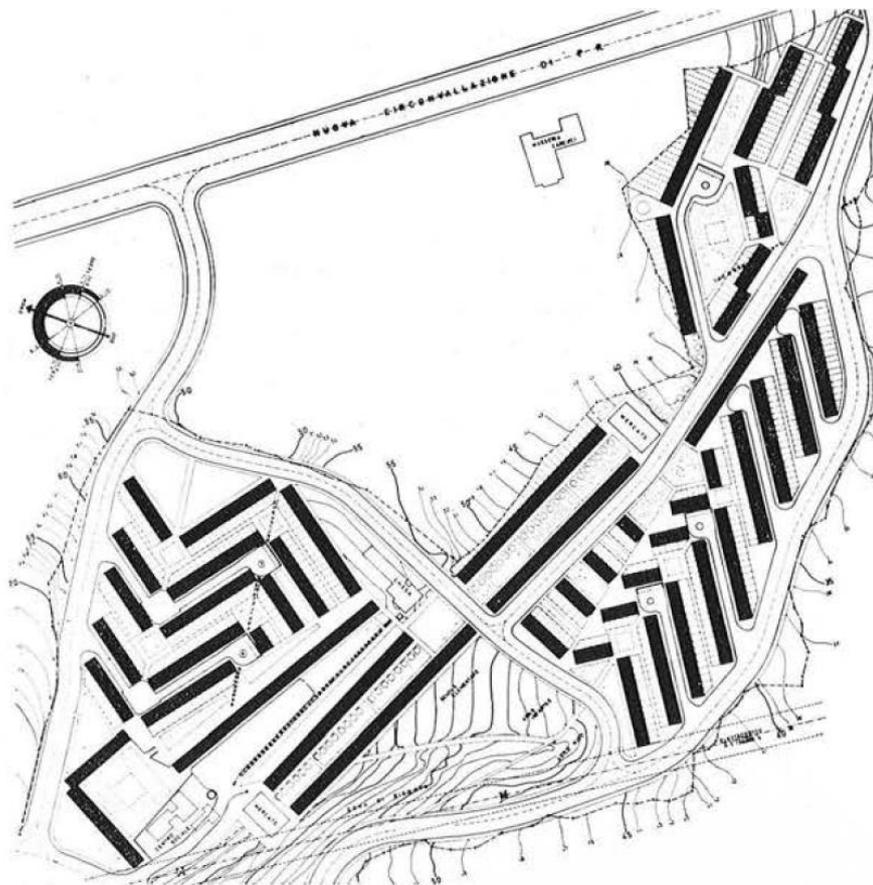


Figura 4-24 - Planimetria del Quartiere Zia Lisa I a Catania (Acocella, 1980)

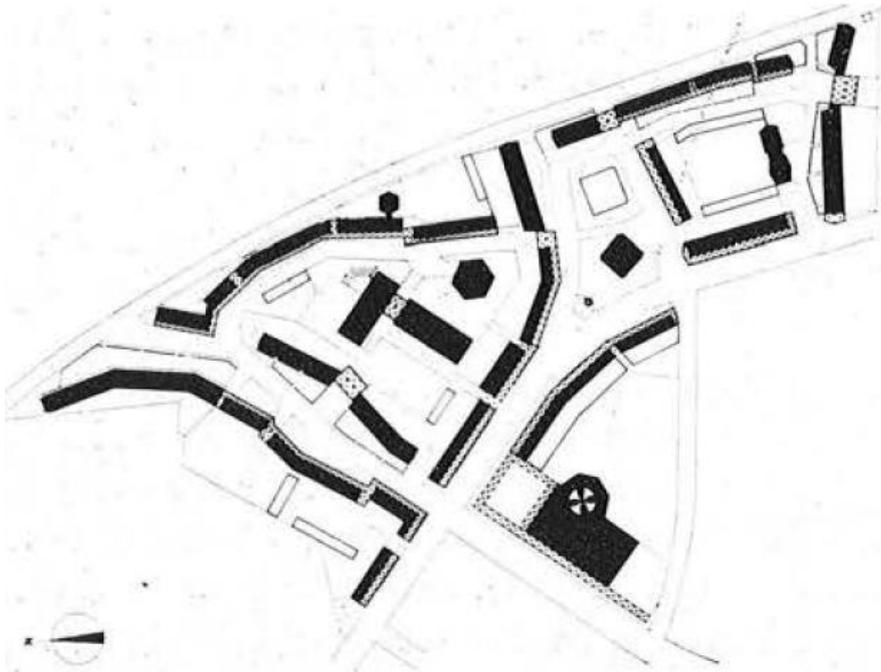


Figura 4-25 - Planimetria del Quartiere S.Donato a Bologna (Acocella, 1980)

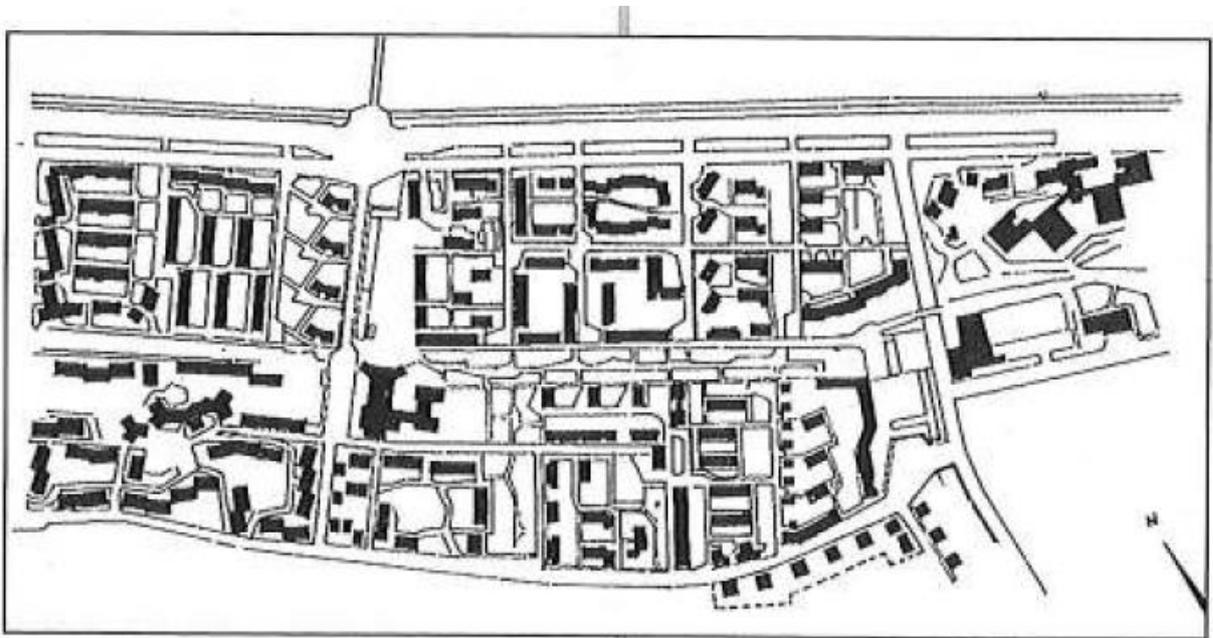


Figura 4-26 - Planimetria del Quartiere Isolotto a Firenze (Secchi and Toti, 2000)



Figura 4-29 - Planimetria del PEEP a Galcetello-Prato 1975-1981 (Fantozzi and Roda, 1992)



Figura 4-30 - Planimetria del PEEP Mezzana-Prato 1982-1986 (Fantozzi and Roda, 1992)

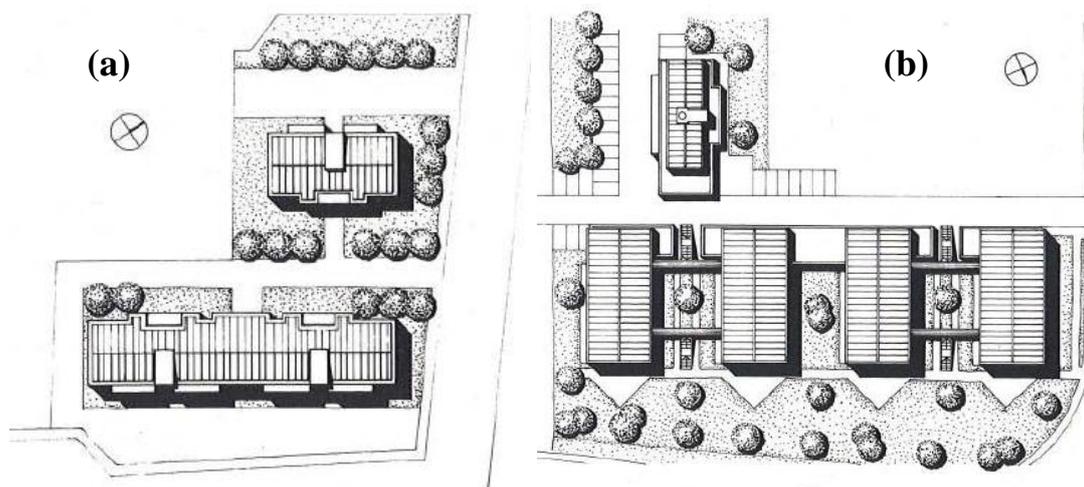


Figura 4-31 - Case L. 457/78 in linea Loc. Casale (a) e Loc. Iolo (b)– Prato 1989-1991 (Fantozzi and Roda, 1992)

Nel piano INA-CASA furono coinvolti circa 1/3 degli Architetti e Ingegneri italiani, tra i quali i migliori dell'epoca, e furono realizzati 2 milioni di vani pari a circa il 13% dei vani complessivamente costruiti nel periodo del piano.

La documentazione e i risultati del Piano INA-CASA è stata oggetto di numerosi studi storici dai quali è scaturita l'importanza del piano e la sua influenza che si proietta fino ai giorni nostri (Acocella, 1980) (Costa, 1985) (Leoni and Maffei, 1998) (Secchi and Toti, 2000) (Bardelli et al., 2003), (Beneforti and Ottanelli, 2012) che giustificano la scelta di indirizzare l'analisi sulla definizione degli edifici di riferimento partendo dallo studio del piano suddetto.

In particolare si registra la rottura con le tipologie ottocentesche dell'anteguerra caratterizzate da soluzioni compositive a blocco chiuso intorno a cortili e chiostrine, rivelatesi scarsamente ventilate e poco igieniche e soleggiate, e che aveva caratterizzato nel passato larga parte del social housing italiano.

Fu introdotta la tipologia edilizia di maggior successo (Marta and Panzarasa, 1963): la casa multipiano in linea con due alloggi per piano, sia isolata (Figura 4-20) che continua (Figura 4-21), tuttora largamente usata dai costruttori privati e dalle cooperative di abitazione (Fantozzi and Roda, 1992) (Bardelli et al., 2003) (Roda et al., 2009) mentre molto rare sono le soluzioni a torre non contemplate nei fascicoli INA-CASA. Il tipo in linea risulta sostanzialmente dalla ripetizione del modulo tipologico elementare formato dall'aggregazione di due o più alloggi attorno a un vano scala comune.

In Figura 4-20 è evidenziato lo schema tipico di edifici “casa isolata” matrice generativa del tipo “casa in linea continua” (Figura 4-32) e relative aggregazioni a livello di quartiere urbano (da Figura 4-22 a Figura 4-31).

La suddetta tipologia riassume in modo inequivocabile i caratteri invariati tipici della stessa:

- posizione dei collegamenti verticali con distribuzione degli accessi puntiforme diffusa (vano scale che disimpegna corpi di alloggi con affaccio prevalentemente su due lati);
- distribuzione degli alloggi ai pianerottoli (da 2 ad un massimo di 3);
- percorsi interni e spazio servito con separazione netta della zona-giorno dalla zona notte (Figura 4-32) che denuncia anche l’orientamento prevalente dell’asse nord-sud;
- sistema costruttivo a muratura portante che divide l’edificio con un muro di spina che costituisce un vincolo per l’organizzazione degli ambienti dell’alloggio (Figura 4-32).

Da un punto di vista strettamente tipologico le condizioni che caratterizzano maggiormente gli interventi in esame sono le seguenti (Malighetti, 2009):

- corpo di alloggi con affacciamenti su tre lati (casa isolata);
- corpo di alloggi con affacciamenti su due lati contrapposti (aggregazione della casa isolata);
- insediamento risultante dalla aggregazione di più tipi in linea che può assumere diverse forme rispetto al tessuto urbano (Figura 4-33)



Figura 4-32 - Schema di casa multipiano continua Caso C4 (INA-CASA, 1949)

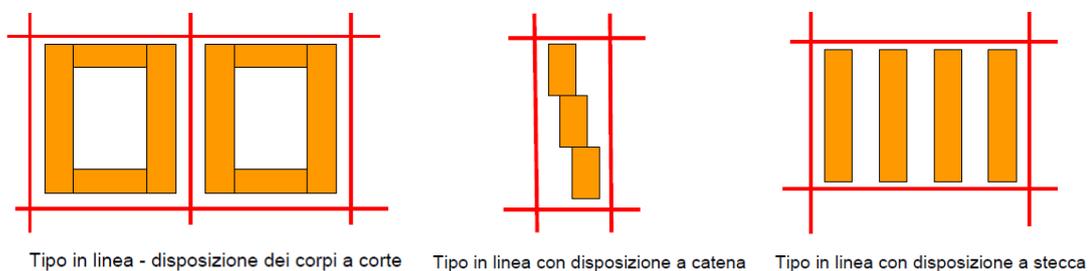


Figura 4-33 - Rapporto tra forma dell'isolato e tipo edilizio (Malighetti, 2009)

Lungo tutti i quattordici anni di attività dell'Ente, specialmente nel secondo settennio, il tipo edilizio in linea ha rappresentato lo schema più utilizzato.

La preferenza che gli è stata data da parte dei progettisti è legata, oltre all'esigenza del Piano di economizzare sui costi di costruzione e di urbanizzazione, anche alla sua capacità di caratterizzare gli spazi urbani individuati con la composizione dei vari quartieri attraverso un segno unitario chiaramente percettibile a livello planimetrico (da Figura 4-22 a Figura 4-31).

A livello di alloggio era evidenziata la necessità di distinguere nettamente la zona notte (servita dal bagno) dalla zona giorno, e di dotare gli alloggi di ampie logge e balconi per la vita familiare all'aperto (Figura 4-32), di studiare attentamente i vani di servizio e di disimpegno: di fatto queste indicazioni sono state le premesse per tutte le abitazioni condominiali realizzate in Italia.

Per quanto attiene alle articolazioni dimensionali, il Fascicolo 1 (INA-CASA, 1949) specificava le superfici utili minime (misurate al netto delle logge e dei balconi) che variavano da 30 a 90 m² rispettivamente per alloggi da 1 a 5 vani utili. Per completezza, gli schemi distributivi di alloggi consigliati per l'elaborazione e presentazione dei progetti, raccoglievano circa ottanta soluzioni. Le superfici delle finestre dovevano essere non inferiori ad 1/6 della superficie utile della stanza.

E' bene ricordare che furono proprio il Piano INA-CASA prima e GESCAL poi, a riportare indicazioni precise in materia di qualità abitativa e di igiene, aggiornando le indicazioni contenute nel R.D. 1265/1934, recante l'approvazione del Testo Unico delle Leggi Sanitarie, modificato sono nel 1975 (D.M. 5/7/1975) (Rocco et al., 2016)

Le scelte suddette rispecchiavano gli indirizzi della manualistica progettuale post-bellica (Consiglio nazionale delle ricerche, 1998) mentre con il concorso nazionale del 1949 si forniva il Fascicolo 2 (INA-CASA, 1950).

Tale opuscolo, continua la consuetudine di fornire suggerimenti e immagini che prefigurano larga parte della futura produzione architettonica dell'INA CASA.

Il Fascicolo 2 (INA-CASA, 1950) raccoglieva, peraltro, i risultati dell'indagine condotta sulle esigenze delle famiglie assegnatarie tendenti ad evidenziare le soluzioni architettoniche più soddisfacenti e fu incentrata principalmente sulle caratteristiche funzionali dei vari tipi di edifici, alloggi e loro elementi costitutivi (cucine, scale, stanze, lavatoi, ecc.).

Scrive Acocella (1980): *"Sollecitati a rispondere su tali argomenti gli utenti mostrarono, tra l'altro, di preferire edifici alti al massimo quattro piani (visto che non si erano installati ascensori negli edifici con oltre tre piani) con gli alloggi su un unico livello, mentre criticarono ampiamente gli alloggi a piano terra, le scale completamente o parzialmente scoperte, le cucine aperte sul soggiorno, le stanze formate da pareti intersecantesi secondo angoli acuti od ottusi, i soggiorni con funzione di distribuzione per gli altri locali dell'alloggio, la mancata realizzazione di cantine, ecc."*

Al fine di rispondere alle esigenze sopra espresse si promuoveva la progettazione di edifici con pochi piani, la realizzazione di alloggi a piano terra rialzati di almeno 60 cm. al di sopra del piano di campagna, l'abbandono degli alloggi che si sviluppano su due piani e delle scale sistemate all'esterno.

Anche gli schemi distributivi furono in parte rivisti a partire dai minimi di superficie utile: furono eliminati gli alloggi composti di un unico vano utile e furono stabilite le superfici minime di 50, 70, 90 e 110 m² rispettivamente per gli alloggi di 2, 3, 4 e 5 vani utili.

Il Fascicolo 2 (INA-CASA, 1950), inoltre, affrontò molto dettagliatamente la progettazione dei singoli ambienti (cucine, soggiorni, camere, gabinetti, ripostigli, lavatoi e stenditoi, logge e balconi, ecc.), fornendo per ognuno di essi modifiche e suggerimenti legati alle preferenze emerse dall'indagine.

Con il Piano GESCAL (1963-1973) si proseguiva sostanzialmente nell'adottare tipi e sistemi di aggregazione mutuati dal piano INA-CASA.

Infatti, si raccoglievano in un apposito fascicolo le medesime raccomandazioni relativamente all'esposizione degli alloggi, alle distanze fra i corpi di fabbrica, ai cortili, ai vincoli del piano terreno, all'altezza dei piani abitabili, alle scale comuni.

L'unica apprezzabile differenziazione consiste nelle modifiche delle superfici degli alloggi che venivano incrementate e raggruppate in quattro tipi, con superfici da 64 a 112 m² rispettivamente per alloggi composti da 2 a 5 vani utili, indifferenziate a seconda della tipologia edilizia (a schiera, multipiano in linea o a torre). L'unificazione delle superfici utili per qualsiasi tipologia, con una possibilità di variazione dimensionale molto limitata, ha determinato una uniformità di scelta e schemi distributivi uniformi.

Ciò è confermato dal fatto che le realizzazioni hanno visto l'abbandono quasi completo della tipologia edilizia a schiera per un uso quasi generalizzato di edifici in linea e limitatamente a torre.

L'eredità dei piani INA-CASA e GESCAL si è protratta direttamente fino agli anni interessati dalla legge 166 del 1975, che ha consentito per la prima volta di realizzare abitazioni con bagni areati meccanicamente e scale prive di illuminazione naturale, consentendo così aggregazioni diverse con profondità maggiori dei copri di fabbrica.

Tali variazioni non hanno tuttavia modificato sostanzialmente i tipi edilizi per il numero limitato delle varianti descritte, poco adottate anche per l'aumento dei consumi energetici che tali varianti comportavano.

La Legge 513/1977, Piano decennale dell'edilizia, ha poi ridimensionato le superfici degli alloggi GESCAL riducendole di circa il 15% e riportandole a quelle INA-CASA,

con superficie netta minima di 45 m² e massima di 95 m², mentre sono state consentite altezze interne nette ridotte a 2,70 m (D.M. 5/7/1975).

Le competenze in materia di edilizia sociale sono poi state trasferite alle Regioni che hanno mantenuto sostanzialmente invariati gli aspetti tipologico distributivi e compositivi, con la predominanza assoluta della casa multipiano in linea.

Ciò è confermato anche dal concorso nazionale per progetti-tipo bandito nel 1978 da parte della Regione Lombardia, con il quale gli IACP lombardi erano tenuti a realizzare i loro programmi.

Gli esiti del concorso (Bernstein and Piccarreta, 1978) e l'esame dei provvedimenti edilizi di altre regioni (Acocella, 1980)), evidenziano la sostanziale uniformità delle tipologie in tutto il periodo di validità del piano decennale e fino ad oggi riverberato nell'edilizia privata (ISTAT Censimento della Popolazione e delle Abitazioni 2011) che ha visto nella casa multipiano in linea la risposta economicamente più vantaggiosa per il mercato e apprezzata anche dagli utenti, (Roda et al., 2009)

Nelle Figura 4-34 e seguenti sono riportati alcuni schemi planimetrici di progetti qualificati nel concorso del 1978 della Regione Lombardia, dove il tema assegnato ai progettisti era di fornire tipologie di alloggi di dimensioni diverse (tipicamente da 45 a 95 m²), aggregabili in diverse soluzioni (dalla linea alla casa a torre), suscettibili di adottare schemi tecnologico-costruttivi propri della prefabbricazione, e da cui si evincono due aspetti importanti sul fronte tipologico:

- la persistenza in tutti i progetti della matrice tipologica tradizionale dell'edificio in linea (sostanzialmente INA-CASA);
- lo sforzo dei progettisti di trovare delle varianti (case con un unico affaccio, disimpegnate a ballatoio o a torre, duplex, servizi igienici ciechi, ecc.) che tuttavia sono quasi sempre meno convincenti della linea sotto il profilo igienico-sanitario per la carente ventilazione, illuminazione ed esposizione al soleggiamento naturale.

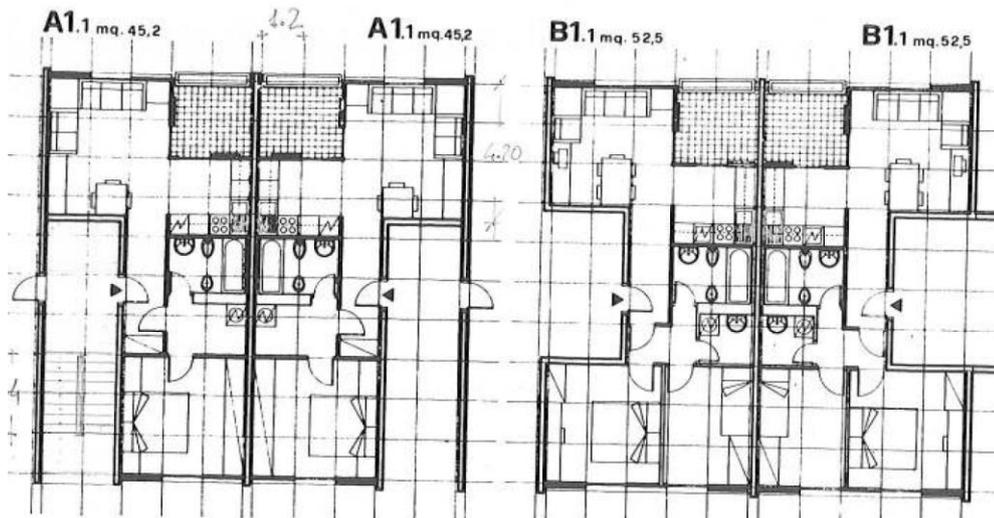


Figura 4-34 - Progetto gruppo ABACO - case in linea (Bernstein and Piccarreta, 1978)

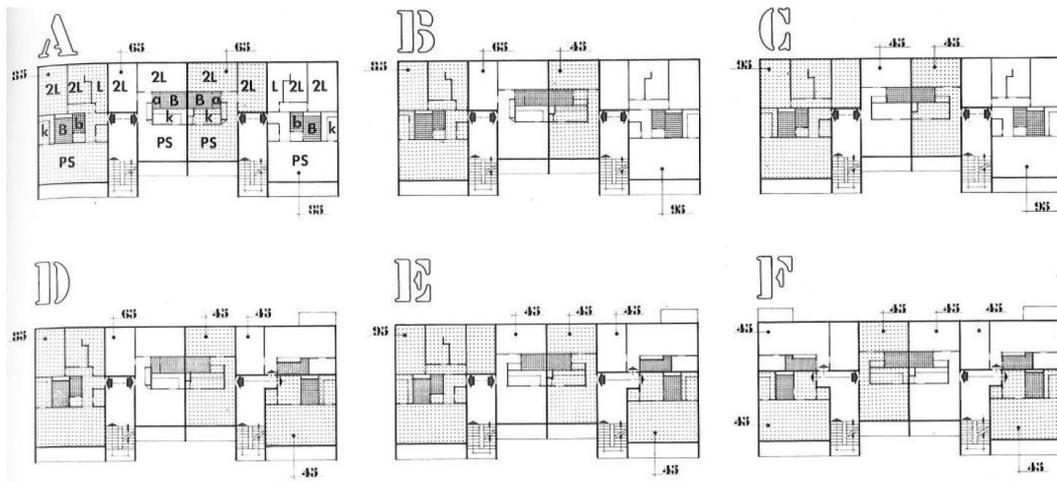


Figura 4-35- Progetto gruppo B1-C1-1 case in linea (Bernstein and Piccarreta, 1978)

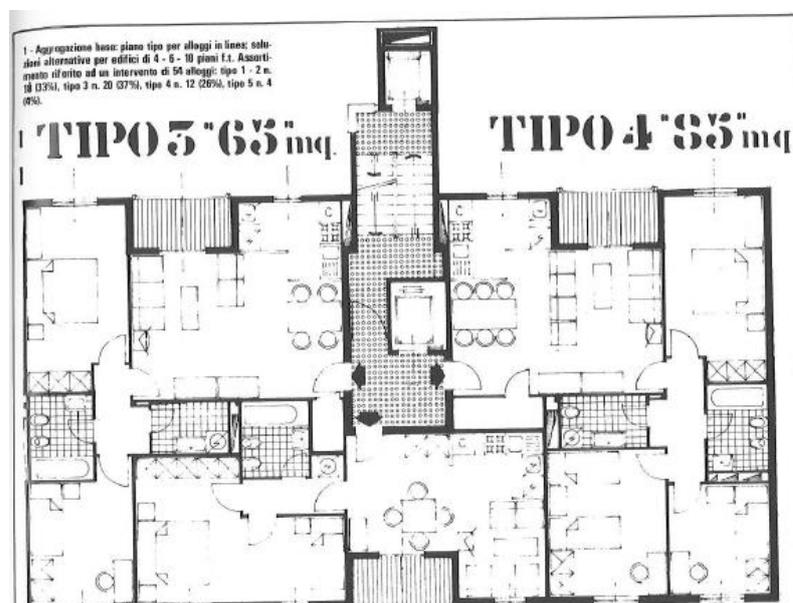


Figura 4-36 - Progetto gruppo CL-C 300 case in linea con vano scale che disimpegna tre alloggi (Bernstein and Piccarreta, 1978)

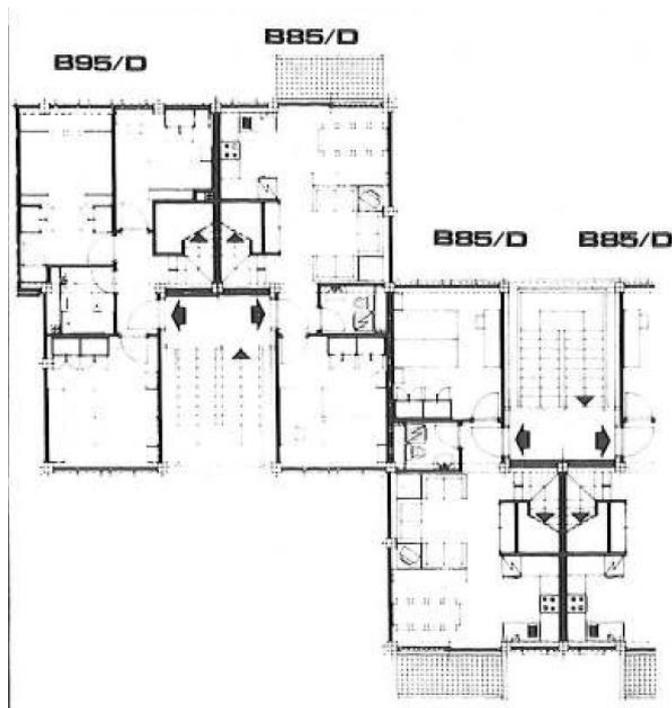


Figura 4-37 Progetto gruppo ERA ORA! case in linea con alloggi duplex e aggregazione a catena (Bernstein and Piccarreta, 1978)

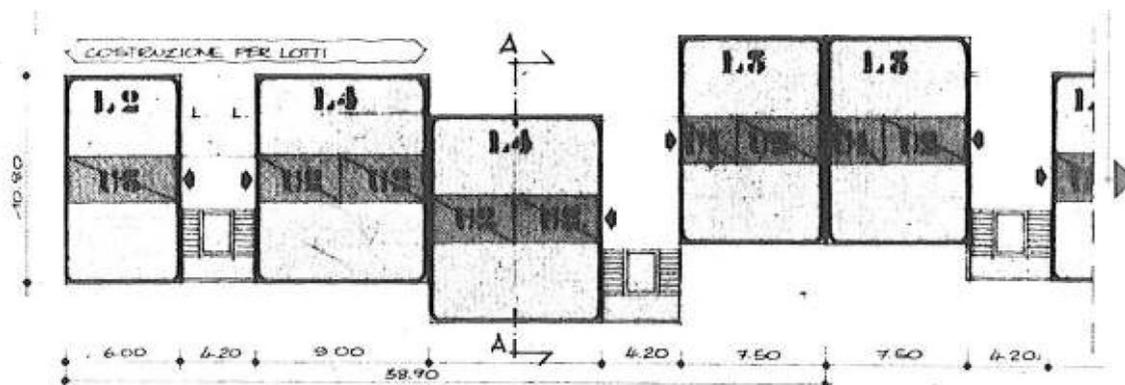


Figura 4-38 - Progetto gruppo EXTRASISTOLE case in linea e aggregazione a catena (Bernstein and Piccarreta, 1978)

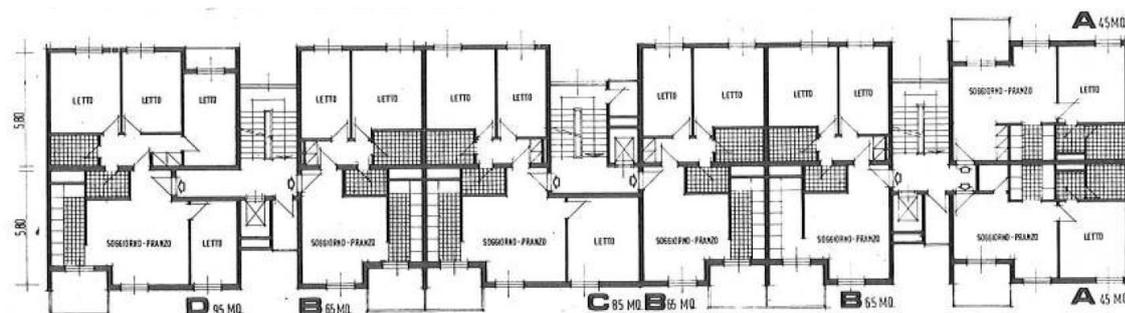


Figura 4-39 - Progetto gruppo PLOTTER case in linea con alloggi da 45, 65 e 95 m² (Bernstein and Piccarreta, 1978)

L'analisi dei dati presentati nella precedente Sezione 3.1 permette di stimare, sebbene in maniera indiretta e approssimata il numero degli alloggi che a livello nazionale risultano collocati in edifici in linea, che può essere compreso fra circa 9'000'000 (30% del totale degli alloggi presenti in Italia) e circa 12'250'000 (quasi il 40%). La stima è stata effettuata detraendo dal numero totale di appartamenti collocati in edifici residenziali (31'138'878), quelli situati in gli edifici con meno di 4 unità immobiliari (edifici unifamiliari, bi-familiari e piccole palazzine), quelli situati in edifici con 2 piani fuori terra e nessun vano scala comune (edifici a schiera) e quelli in edifici con 4 o più piani con una sola scala comune (categoria che comprende gli edifici a torre). Poiché queste categorie sono parzialmente sovrapposte e nell'ultima, in particolare, sono senz'altro inclusi edifici in "linea isolata" di 4 o 5 piani che non andrebbero detratti, la stima effettuata non può che essere indicativa e da considerare di larghissima massima.

4.3.2 Individuazione del campione di edifici

Da quanto osservato è apparso logico, al fine di individuare gli edifici di riferimento sui cui condurre le valutazioni prestazionali, condurre un'analisi approfondita sui tipi edilizi in linea realizzati nell'ambito dei piani suddetti,

A tal fine è stato individuato un campione di 145 edifici costruiti tra il 1946 ed il 1977 nell'ambito del Piano INA-CASA e GESCAL realizzato a Pistoia dallo IACP (Beneforti and Ottanelli, 2012) rappresentativi della produzione edilizia descritta nel paragrafo precedente.

I quartieri INA CASA e IACP di Pistoia esaminati ed impiegati per il campionamento degli edifici oggetto di analisi sono:

- Casermette/Via della Pagliucola - Viale Malta - Viale Italia;
- Villaggio Belvedere;
- Scornio Est;
- Scornio Ovest;
- San Biagio;
- Altri edifici isolati collocati in Via Castel de Guidi e Via Valiani e in Via Legno Rosso e Via dei Barbi a Capostrada.

La collocazione dei quartieri analizzati nel territorio della città di Pistoia è mostrata in Figura 4-40.

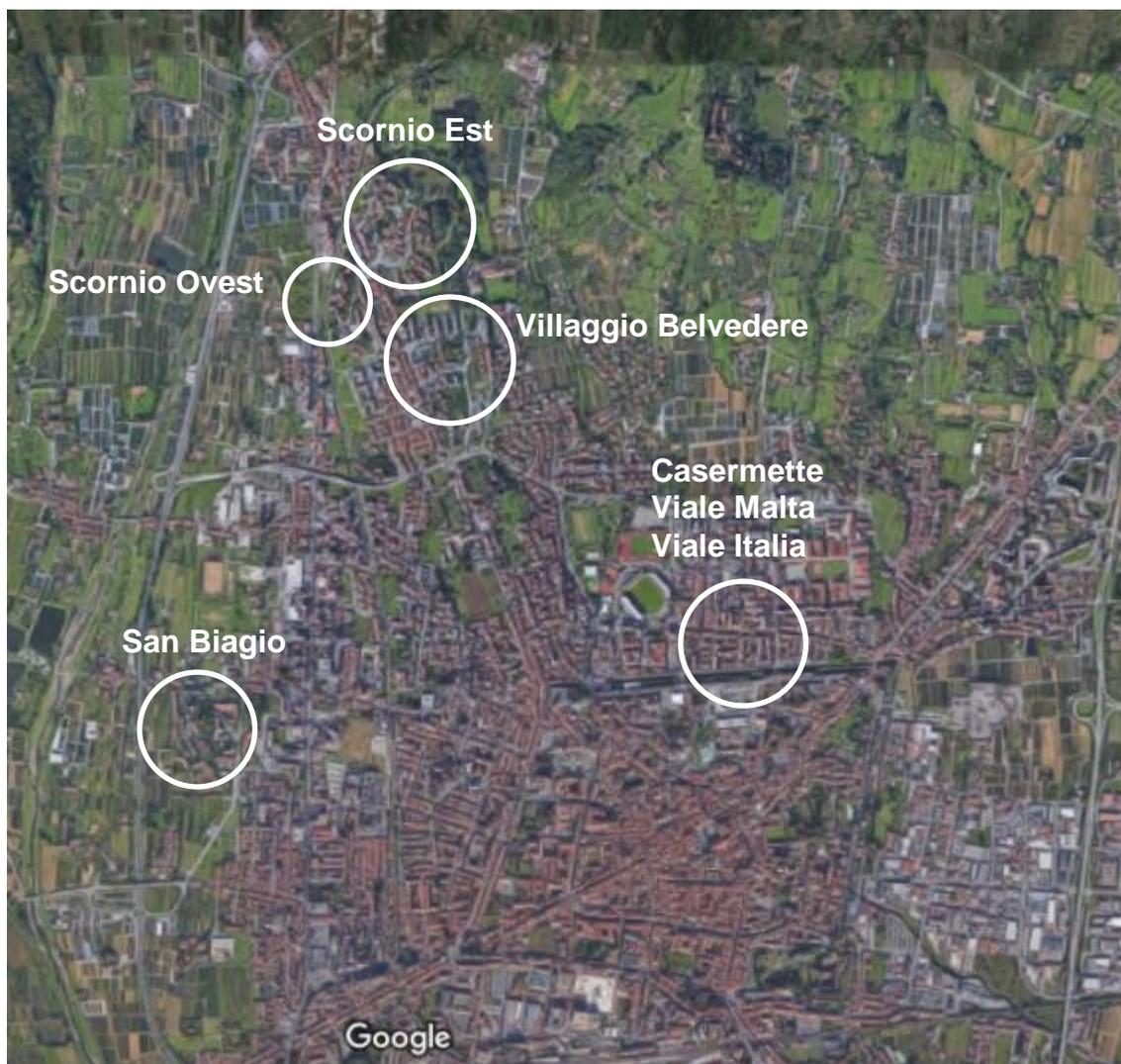


Figura 4-40 – Localizzazione dei quartieri di edilizia ERP analizzati.

Nella Figura 4-41 è riportata una vista dall'alto del quartiere, denominato *Casermette*, a causa della vicinanza dello stesso alla *Caserma Marini*, ed edificato nel periodo 1946-1956 da IACP e INA CASA (primo periodo).

Già la vista dall'alto consente di individuare le tipiche tipologie in linea utilizzate, compreso la variante delle aggregazioni a catena, del singolo affaccio, del tipo isolato della Figura 4-20 e Figura 4-22. Da un punto di vista costruttivo gli edifici del quartiere presentano tutti struttura in muratura portante, solai latero-cementizi e copertura a falde inclinate con sottotetto non abitabile. In merito alle dotazioni impiantistiche, gli edifici analizzati erano inizialmente dotati di stufe a legna per riscaldamento e produzione acqua calda sanitaria, successivamente sostituiti, negli anni della metanizzazione con impianti autonomi a gas metano con terminali a radiatori. Nella Figura 4-42 e seguenti

sono riportate le planimetrie catastali di alcuni edifici esaminati da cui si evince il sostanziale rispetto delle indicazioni dei Libretti INA-CASA.

Gli interventi di Viale Malta e Viale Italia, limitati a pochi edifici realizzati fra il 1946 e il 1950 al margine destro e inferiore delle *Casermette* presentano caratteristiche dimensionali e tipologiche del tutto omogenee rispetto al nucleo principale.



Figura 4-41 - Vista del quartiere Casermette (includere gli interventi di Viale Malta e Viale Italia) a Pistoia delimitato con tratto rosso

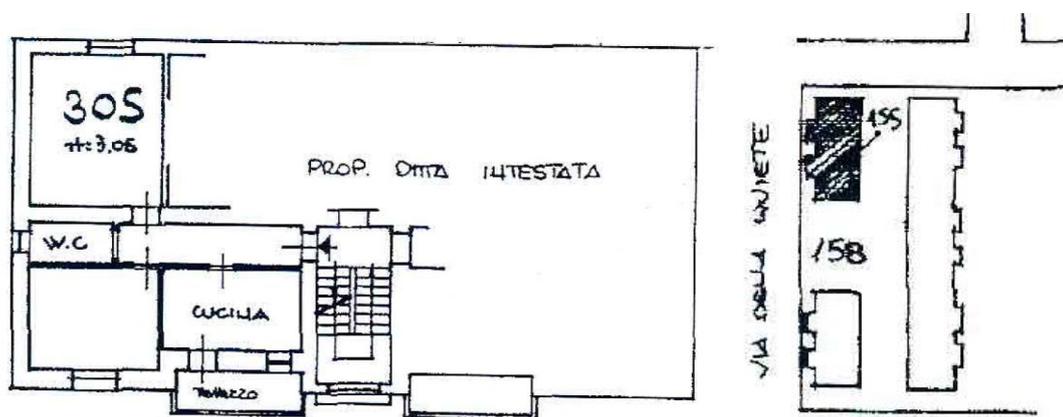


Figura 4-42 - Tipologia di edificio a casa isolata con tre alloggi per pianerottolo con abitazioni costituite da superficie di circa 50 m² (due vani oltre servizi)

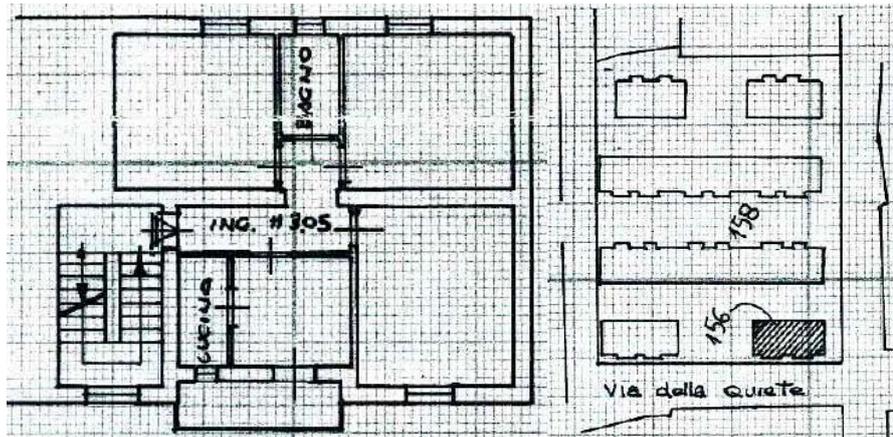


Figura 4-43 - Tipologia di edificio a casa isolata con due alloggi per pianerottolo con abitazioni costituite da superficie di circa 70 m² (tre vani oltre servizi)

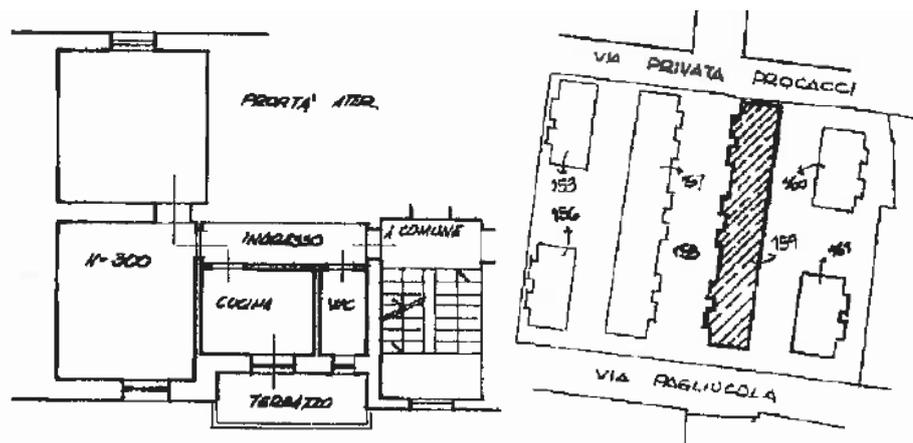


Figura 4-44 - Tipologia di edificio a casa in linea con tre alloggi per pianerottolo con abitazioni costituite da superficie variabili da circa 50 a 70 m² (due-tre vani oltre servizi).

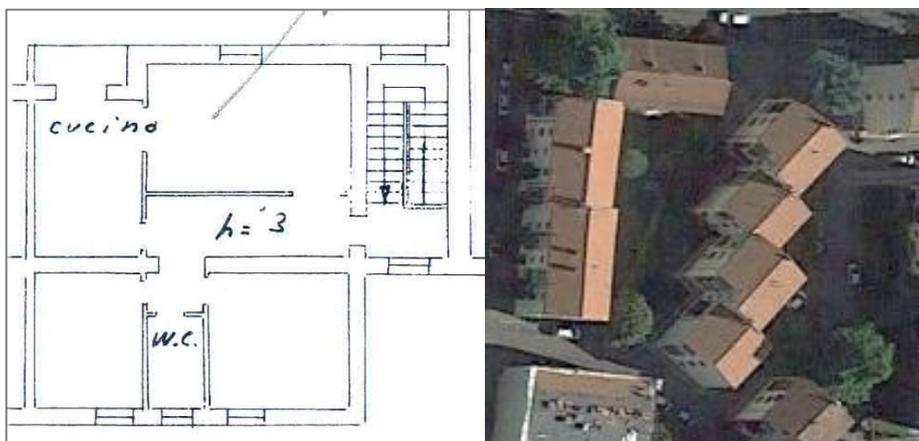


Figura 4-45 - Tipologia di edificio a casa isolata con aggregazione a denti di sega, con abitazioni costituite da superficie di circa 90 m² (quattro vani con cucina abitabile).

Il Villaggio Belvedere (Figura 4-46) progettato e realizzato fra il 1958 e il 1962 da IACP e INA CASA (secondo periodo) nella zona Nord di Pistoia presenta caratteristiche tipologiche e aggregative analoghe a quelle dell'intervento precedente con una prevalenza della tipologia in linea presente sia nella variante isolata (Figura 4-47), che nella variante continua, quest'ultima aggregata sia in forma di stecca che in forma di catena (Figura 4-48). Si differenziano da questo schema tipologico tradizionale, caratteristico della produzione INA CASA, i 4 edifici posti al centro del quartiere e progettati dall'Arch. Savioli che presentano una particolare distribuzione a ballatoi. L'eccezionalità tipologica di questi progetti fa sì che costituiscano un caso isolato, individuabile ed anomalo rispetto al patrimonio edilizio analizzato. Nel quartiere Belvedere, sebbene costituito per la maggior parte da edifici con struttura in muratura portante, compaiono i primi edifici con struttura in telaio di calcestruzzo armato e muratura di tamponamento a cassavuota in mattoni forati o semipieni non isolata. La maggior parte degli edifici di Belvedere ha 3 o 4 piani fuori terra e un numero di unità immobiliari comprese fra 6 e 12. Alcuni degli edifici più grandi presentano due o più vani scala serviti da ascensori. Compaiono inoltre i primi esempi di edifici progettati e realizzati con impianto di riscaldamento centralizzato.

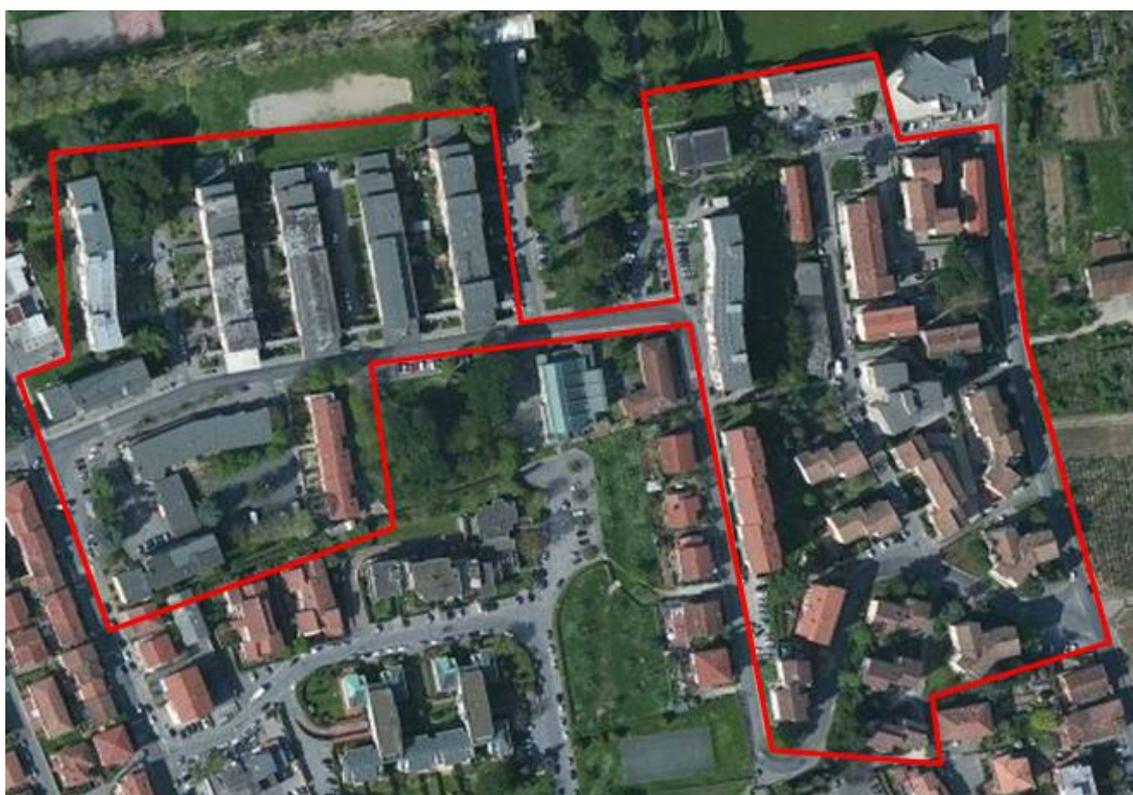


Figura 4-46 - Vista del quartiere Villaggio Belvedere a Pistoia delimitato con tratto rosso

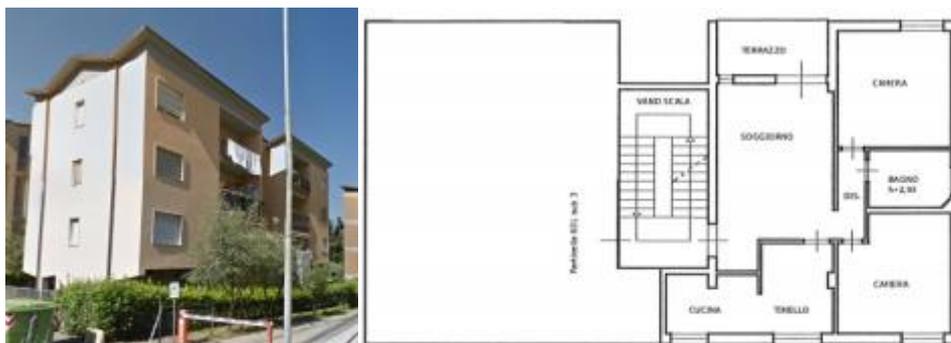


Figura 4-47 - Esempio di tipologia in linea a casa isolata con struttura portante in telaio di c.a. (quartiere Villaggio Belvedere)

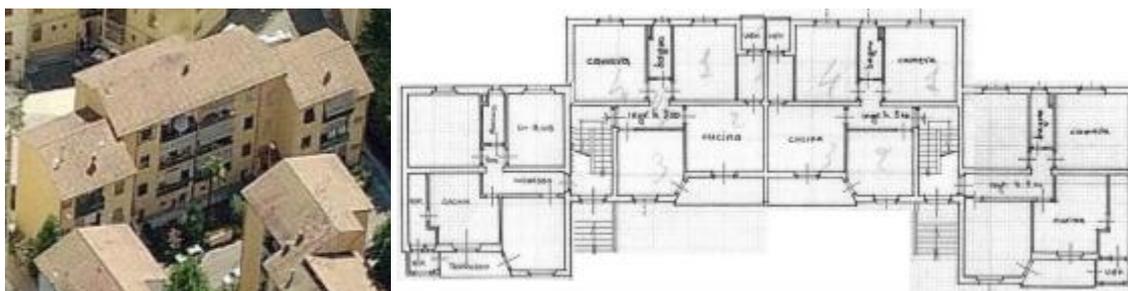


Figura 4-48 – Esempio di tipologia in linea con aggregazione a catena e struttura in muratura portante (quartiere Villaggio Belvedere)

Il quartiere Scornio Est (Figura 4-49) è stato progettato e realizzato dal 1965 al 1974, dallo IACP e da GESCAL. Quest'ultimo programma entra in vigore nel 1963 e sostituisce il precedente programma INA CASA dal quale eredita, sostanzialmente immutati, tipi edilizi e sistemi di aggregazione. Anche in questo intervento prevalgono nettamente le tipologie in linea nelle varianti aggregate a stecca o a casa isolata (Figura 4-50) con un solo vano scala. Sono presenti anche se in forma minoritaria (4 edifici su 34) tipologie con vano scala centrale che distribuisce 4 alloggi per piano. Gli edifici sono realizzati con struttura a telaio in calcestruzzo armato che permette la realizzazione del piano terra pilotis, presente in molti degli esempi analizzati. Gli edifici di Scornio Est hanno in media dimensioni contenute; la maggior parte presentano 2 o 3 piani abitati più piano terra pilotis e un numero di appartamenti inferiore a 10.



Figura 4-49 - Vista del quartiere Scornio Est a Pistoia delimitato con tratto rosso

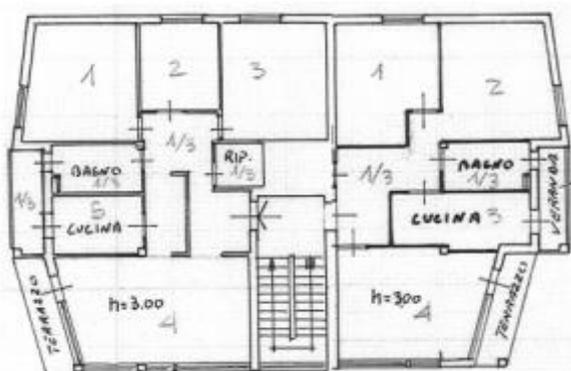


Figura 4-50 – Esempio di tipologia in linea a casa isolata nel quartiere Scornio Est

I quartieri di Scornio Ovest (Figura 4-51) e di San Biagio (Figura 4-53), collocati rispettivamente alla periferie Nord e Ovest della città sono stati progettati e realizzati fra il 1972 e il 1978 dallo IACP e da alcune cooperative edili a seguito dei diversi provvedimenti normativi di finanziamento dell'edilizia residenziale pubblica che, a partire dalla Legge 865/71, hanno sostituito il programma GESCAL. Gli edifici di Scornio Ovest e San Biagio presentano struttura a telaio in calcestruzzo armato e piano terra pilotis, soventemente utilizzato come parcheggio. Dal punto di vista impiantistico la maggior parte degli edifici dei due quartieri analizzati erano originariamente dotati di impianto di riscaldamento centralizzato. Tale dato è coerente con quanto riportato nei documenti del CRESME (Centro ricerche economiche, sociologiche e di mercato

nell'edilizia, 1971) secondo i quali dal 1962 al 1971 la quota di impianti centralizzati è aumentata in maniera netta raggiungendo l'85% delle abitazioni a livello nazionale.

La tipologia edilizia prevalente è quella della casa in linea aggregata a stecca (Figura 4-52 e Figura 4-54) che caratterizza univocamente l'intervento di Scornio Ovest. A San Biagio sono presenti anche edifici in linea aggregati a catena o ad angolo ed edifici costituiti da un unico modulo isolato. Di fatto gli schemi tipologici e aggregativi, tipici della residenza in linea, elaborati nei Libretti INA CASA vengono riproposti anche in questi interventi senza varianti significative. E' da rilevare piuttosto come, seguendo la tendenza nazionale (Acocella, 1980), i due quartieri Scornio Ovest e San Biagio sono caratterizzati, rispetto agli altri esempi analizzati, da una maggiore uniformità e ripetitività tipologica e aggregativa e da una dimensione dei singoli edifici decisamente maggiore. Molti degli edifici presentano 3 o 4 piani abitati oltre al piano terra (diversi edifici di San Biagio raggiungono i 5 piani oltre piano terra) e un numero di appartamenti superiore a 12 a San Biagio e a 16 a Scornio Ovest.

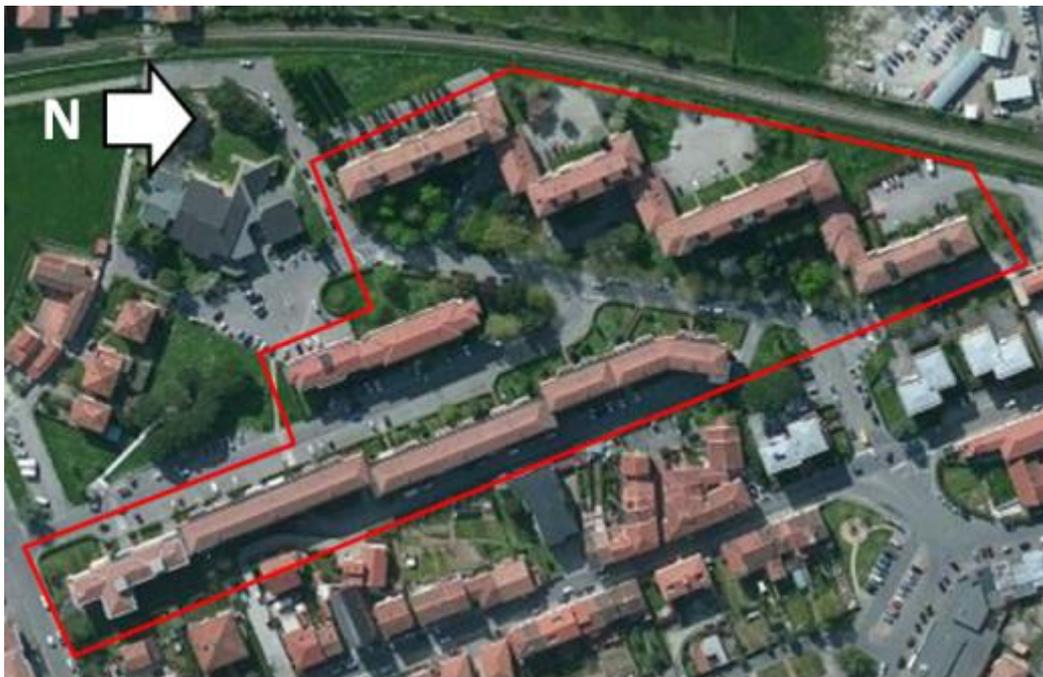


Figura 4-51 - Vista del quartiere Scornio Ovest a Pistoia delimitato con tratto rosso



Figura 4-52 - Esempio di tipologia in linea a stecca nel quartiere Scornio Ovest



Figura 4-53 - Vista del quartiere San Biagio a Pistoia delimitato con tratto rosso



Figura 4-54 - Esempio di tipologia in linea a stecca nel quartiere San Biagio

Gli altri edifici analizzati sono piccoli raggruppamenti di due o quattro fabbricati collocati in Via Castel de Guidi, Via Valiani, Via Legno Rosso e Via dei Barbi a Capostrada. Questi interventi presentano tutti una tipologia a “palazzina” con vano

scala centrale che distribuisce tre alloggi per piano (Figura 4-55). Ad eccezione dei due edifici di Via Valiani, progettati nel 1971 con struttura in telaio di c.a. e altezza pari a 6 piani fuori terra, gli altri sono tutti costruiti nel periodo 1956-1959 con struttura in muratura portante e altezza compresa fra 3 e 4 piani.



Figura 4-55 – Esempio di edificio collocato in Via Castel de Guidi

In generale, da un punto di vista tipologico, gli interventi selezionati presentano una sostanziale continuità rispetto agli esempi e agli schemi aggregativi individuati nei Libretti INA CASA (INA-CASA, 1949, 1950) che, fatte salve poche eccezioni, per questo ben individuabili, hanno influenzato l'edilizia residenziale pubblica e privata nei decenni successivi, andando a costituire una vera e propria matrice architettonica identitaria. Dal punto di vista tecnologico, le più significative modifiche apportate nel tempo all'involucro edilizio degli edifici dei diversi quartieri analizzati riguardano la sostituzione dei serramenti. A partire dalla seconda metà degli anni '70 gli infissi con telaio in legno e vetro singolo sono stati sostituiti o accoppiati con infissi con doppio vetro e telaio in legno o alluminio con prestazioni energetiche decisamente migliori. L'altra frequente modifica apportata all'assetto originario degli edifici è costituita dalla chiusura delle logge con serramenti che ha portato alla realizzazione, per le esposizioni a Sud, delle prime serre solari vernacolari. Da un punto di vista impiantistico oltre alla già citata sostituzione delle stufe a legna negli edifici del periodo INA CASA (Casermette e in parte Belvedere), negli ultimi decenni si è assistito alla dismissione di molti degli impianti di riscaldamento condominiali presenti a Scornio Est ed Ovest e a San Biagio a favore di impianti autonomi con generatori a gas per la produzione combinata di riscaldamento e acqua calda sanitaria.

4.4 Analisi statistica del campione di edifici individuato

4.4.1 Riferimenti metodologici per classificazione degli edifici

Per l'elaborazione di un'appropriata metodologia per la raccolta e l'analisi delle informazioni e dei dati sul patrimonio edilizio individuato ai fini della successiva valutazione energetica si è fatto riferimento al quadro metodologico elaborato per il progetto europeo TABULA (Corrado et al., 2014).

Questo ha definito a livello Europeo una serie di metodologie comuni per i processi di *stock aggregation*³⁸ con riferimento alla stima dei fabbisogni energetici degli edifici residenziali esistenti.

Nell'ambito del progetto TABULA è stata individuata nello specifico una metodologia di individuazione e selezione di “tipologie edilizie” (edifici modello o edifici-tipo) rappresentative dei patrimoni edilizi di riferimento, caratterizzate da valori “tipici” dei parametri prestazionali edilizi e impiantistici più strettamente correlati al fabbisogno energetico dell'edificio.

In TABULA, per ciascuna zona climatica o regione climatica individuata (vedi il precedente paragrafo 2.2), il patrimonio edilizio di riferimento è classificato secondo le seguenti categorie:

- Epoca di costruzione;
- Dimensione dell'edificio.

Per quanto riguarda l'epoca di costruzione sono state individuate otto classi (periodi storici):

- **classe 1: fino al 1900;**
- **classe 2: dal 1901 al 1920;**
- **classe 3: dal 1921 al 1945;**
- **classe 4: dal 1946 al 1960;** caratterizzata dal Dopoguerra e dalla Ricostruzione;
- **classe 5: dal 1961 al 1975;** definita dal periodo della crisi petrolifera;

³⁸ Sono definiti *stock aggregation* i processi che prevedono di analizzare e classificare gli edifici esistenti per individuare esempi rappresentativi sulla cui base valutare le prestazioni energetiche da attribuire proporzionalmente a tutto il patrimonio considerato (IEA - ECBCS, 2004).

- **classe 6: dal 1976 al 1990**; contraddistinta dall'applicazione delle prime disposizioni legislative in materia di efficienza energetica negli edifici (Legge 373/76, D.P.R.1052/77, D.M. 10/3/1977, D.M. 30/7/1986);
- **classe 7: dal 1991 al 2005**; contraddistinta dall'applicazione della seconda generazione di norme sulla prestazione energetica degli edifici (Legge10/91, D.P.R. 412/93 e D.P.R. 551/99);
- **classe 8: dopo il 2005**; contraddistinta dall'applicazione della normativa più recente in materia di prestazione energetica degli edifici (D.Lgs. 192/2005, D.Lgs 311/06 e D.P.R. 59/2009).

Ciascuna delle classi è caratterizzata da tipologie costruttive, impiantistiche e relative prestazioni energetiche omogenee; i limiti cronologici fra le classi sono stati, infatti, individuati facendo riferimento sia all'introduzione di innovazioni tecnologiche che alle tappe dell'evoluzione normativa.

Per quanto riguarda la dimensione dell'edificio sono state individuate quattro classi che si riferiscono alla tipologia architettonica dell'edificio:

- **Casa monofamiliare:** unica unità immobiliare, su uno o due piani, di tipo isolato o confinante con un altro edificio;
- **Casa a schiera:** costituita da un'unica unità immobiliare, su uno o due piani, confinante con altre unità abitative (complesso a schiera);
- **Edificio multifamiliare:** edificio di ridotte dimensioni caratterizzato da un numero limitato di unità immobiliari (da 2 a 5 piani e fino a 15 appartamenti, oppure da 2 a 4 piani e da 16 a 20 appartamenti);
- **Blocco di appartamenti:** edificio di grandi dimensioni caratterizzato da un numero più elevato di unità immobiliari.

In base alle suddette classificazioni per ognuna delle aree climatiche individuate è possibile sviluppare una “Matrice della Tipologia Edilizia”, di cui alla Figura 4-56 è riportata l'esempio elaborato, per la zona climatica E, sulla base di un'analisi del patrimonio edilizio residenziale del Piemonte. La matrice è completata individuando per ognuna delle celle un edificio-tipo adeguatamente rappresentativo di quella specifica categoria.

CLASSE DI DIMENSIONE EDILIZIA

Area climatica media	CASE MONOFAMILIARI	CASE A SCHIERA	EDIFICI MULTIFAMILIARI	BLOCCHI DI APPARTAMENTI
1 Fino al 1900				
2 1901-1920				
3 1921-1945				
4 1946-1960				
5 1961-1975				
6 1976-1990				
7 1991-2005				
8 Dopo il 2005				

CLASSE DI EPOCA DI COSTRUZIONE

Figura 4-56 - Esempio di Matrice della Tipologia Edilizia italiana elaborata per l'area climatica media (Zona E) con illustrazione degli edifici-tipo (Corrado et al., 2014).

TABULA prevede tre diverse metodologie per la selezione o definizione degli edifici-tipo (Corrado et al., 2014):

- *Real Example Building (ReEx)*: l'edificio-tipo è un edificio realmente esistente, rappresentativo della categoria e selezionato in base all'esperienza. Questo approccio si utilizza in assenza di dati statistici attendibili sulle caratteristiche di un campione rappresentativo degli edifici che appartengono a quella determinata categoria.
- *Real Average Building (ReAv)*: l'edificio-tipo è un edificio realmente esistente caratterizzato da parametri geometrici e tecnologici coincidenti con i valori medi assunti dagli stessi parametri per un campione rappresentativo degli edifici che appartengono a quella determinata categoria. Questo metodo presuppone la raccolta e l'elaborazione statistica dei dati riguardanti il campione di edifici;
- *Synthetical Average Building o Theoretical Building (SyAv)*: l'edificio-tipo non corrisponde ad un edificio realmente esistente ma è un edificio immaginario o virtuale (un archetipo) caratterizzato da parametri geometrici e tecnologici, determinati statisticamente e coincidenti con i valori medi assunti dagli stessi parametri per un campione rappresentativo degli edifici che appartengono a quella determinata categoria.

Come mostrato nella Tabella 4-2, differenti combinazioni di questi metodi possono essere applicate per definire indipendentemente:

- i parametri geometrici e morfologici dell'edificio-tipo (come il volume lordo riscaldato, rapporto di forma, superficie utile di pavimento, numero di piani, numero di appartamenti etc.);
- le caratteristiche costruttive e impiantistiche (come la trasmittanza degli elementi tecnici d'involucro, proprietà ottiche degli infissi, rendimenti dei sub-sistemi impiantistici, etc.).

Tabella 4-2 - Diagramma dei metodi per selezionare e definire le caratteristiche geometriche, costruttive e impiantistiche degli edifici-tipo. Rielaborazione da Corrado et al.(2014)

		EDIFICI-TIPO (CARATTERISTICHE GEOMETRICHE EDIFICIO)		
		Edificio reale (scelto secondo l'esperienza)	Edificio reale (scelto da analisi statistica)	Edificio teorico (scelto da analisi statistica)
TIPOLOGIE COSTRUTTIVE E IMPIANTISTICHE	Tecnologia reale presente nell'edificio reale scelto	ReEx edificio-tipo reale scelto secondo l'esperienza dal punto di vista dei caratteri geometrici e caratterizzato dalla tecnologia costruttiva e impiantistica realmente presente nell'edificio scelto	ReAv edificio-tipo reale scelto sulla base dell'analisi statistica dal punto di vista dei caratteri geometrici e caratterizzato dalla tecnologia costruttiva e impiantistica realmente presente nell'edificio scelto	
	Tecnologia scelta secondo l'esperienza	ReEx – ReEx edificio-tipo reale scelto secondo l'esperienza dal punto di vista dei caratteri geometrici e caratterizzato da una tecnologia costruttiva e impiantistica non propria di quell'edificio, ma considerata tipica secondo l'esperienza	ReAv – ReEx edificio-tipo reale scelto secondo analisi statistica dal punto di vista dei caratteri geometrici e caratterizzato da una tecnologia costruttiva e impiantistica non propria di quell'edificio, ma considerata tipica secondo l'esperienza	SyAv – ReEx edificio-tipo immaginario (archetipo), rappresentane la media di un campione dal punto di vista dei caratteri geometrici e caratterizzato da una tecnologia costruttiva e impiantistica considerata tipica secondo l'esperienza
	Tecnologia definita da analisi statistica	ReEx – SyAv edificio-tipo reale scelto secondo l'esperienza dal punto di vista dei caratteri geometrici e caratterizzato da una tecnologia costruttiva e impiantistica non propria di quell'edificio, ma considerata tipica sulla base di un'analisi statistica	ReAv – SyAv edificio-tipo reale scelto secondo analisi statistica, rappresentane la media di un campione dal punto di vista dei caratteri geometrici e caratterizzato da una tecnologia costruttiva e impiantistica non propria di quell'edificio, ma considerata tipica sulla base di un'analisi statistica	SyAv – SyAv edificio-tipo immaginario (archetipo), rappresentane la media di un campione dal punto di vista dei caratteri geometrici e caratterizzato da una tecnologia costruttiva e impiantistica considerata tipica mediante analisi statistica.

Per l' applicazione delle metodologie suddette , al fine di poter attribuire agli edifici-tipo, reali o immaginari, le caratteristiche costruttive ed impiantistiche tipiche della categorie di appartenenza, il gruppo di lavoro del Politecnico di Torino ha elaborato, sulla base della letteratura tecnica e alla normativa di riferimento, alcuni abachi di tipologie di elementi tecnici di involucro (Figura 4-57) e di sistemi e sub-sistemi di riscaldamento, raffrescamento e produzione di ACS (Figura 4-58). Gli abachi forniscono indicazioni riguardo a:

- periodo di massima diffusione;

- prestazione termica (trasmittanza termica (U) e fattore solare ($g_{gl,n}$) per i componenti finestrati);
- rendimenti e alle perdite di energia termica dei sub-sistemi impiantistici.

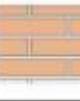
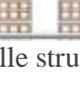
CHIUSURA OPACA VERTICALE (Parete)	Muratura in mattoni pieni (25 cm)		1900	1950	2,01
	Muratura in mattoni pieni (38 cm)		1900	1950	1,48
	Muratura in mattoni pieni (50 cm)		1900	1950	1,14
	Muratura in mattoni pieni (62 cm)		1900	1950	1,02
	Muratura a cassa-vuota con mattoni forati (30 cm)		1930	1975	1,15
	Muratura a cassa-vuota con mattoni forati (40 cm)		1930	1975	1,10

Figura 4-57 – Estratto esemplificativo degli abachi delle strutture opache di TABULA (Corrado et al., 2014)

CAMPO DI APPLICAZIONE	DESCRIZIONE		VETTORE ENERGETICO	PERIODO		PARAMETRO PRESTAZIONALE
	Tipo di generatore	Ubicazione		-	-	
SUH	caldaia standard, bruciatore atmosferico, camino < 10 m	ambiente non climatizzato	gas	-	1995	0,73
		ambiente climatizzato		1996	-	0,79
MUH	caldaia standard, bruciatore atmosferico, camino > 10 m	ambiente non climatizzato	gas	-	1995	0,82
		ambiente climatizzato		1996	-	0,88
Gen	caldaia standard, bruciatore ad aria soffiata	centrale termica	gas	-	1995	0,71
				gasolio	1996	-
MUH	caldaia standard per impianti di riscaldamento autonomi (per appartamento)	ambiente non climatizzato	gas		-	1995
		ambiente climatizzato		1996	-	0,86
-	-	-	-	-	1995	0,85
				1996	-	0,89
-	-	-	-	-	1995	0,85
				1996	-	0,89
-	-	-	-	-	-	0,88
				-	-	0,92

Figura 4-58 - Estratto esemplificativo degli abachi dei sub-sistemi di generazione di TABULA (Corrado et al., 2014)

4.4.2 Schedatura degli edifici campione

Ai fini delle successive fasi di analisi statistica e di valutazione energetica, le specifiche tipologiche, dimensionali, tecnologiche e fisico-tecniche dei 145 edifici residenziali, costituenti il campione di studio, sono state censite mediante la compilazione di fogli di calcolo Excel appositamente predisposti (Tabella 4-3,

Tabella 4-4 e Tabella 4-5).

Tabella 4-3 – Foglio Excel per la raccolta e il calcolo dei parametri utili alla valutazione energetica (Parte 1 – Identificazione dell’edificio e caratterizzazione tipologica e distributiva)

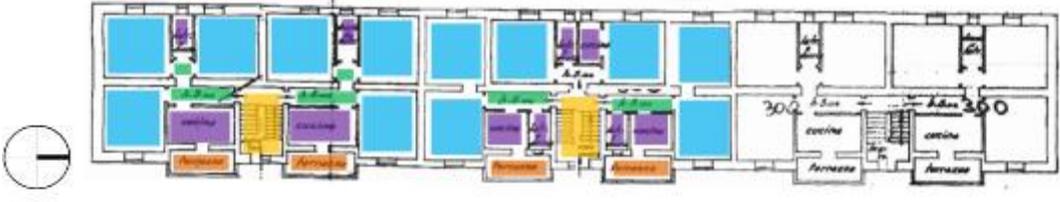
Identificazione e localizzazione dell'edificio									
Numero	Quartiere	Comune	Periodo	Anno di prog.	Ente promotore	Identificativo Catastale			
46479	Via della Pagliuola	Pistoia	1	1946	IACP	Foglio	184	Mapp.	159
Immagini dell'edificio									
									
Caratterizzazione tipologica e distributiva dell'edificio									
Numero di vani scala (moduli tipologici elementari)			3	Numero totale di appartamenti			28		
Numero di piani climatizzati			4	Classificazione tipologica preliminare			Casa in linea continua		
Numero di appartamenti per vano scala per piano			2 / 3	Orientamento fronte			Ovest		
Schema distributivo del modulo tipologico elementare									
									
Legenda									
	Vano scale		Ambienti principali		Ambienti di servizio		Ambienti di collegamento		Balcone/loggia/veranda

Tabella 4-4 - Foglio Excel per la raccolta e il calcolo dei parametri utili alla valutazione energetica (Parte 2 – Caratteristiche geometriche dell’edificio)

Caratteristiche geometriche da estrazione GIS									
Volume (m ³)	7997.9	Superficie (m ²)	547.8	Perimetro (m)	132.7	Spessore corpo fabbrica (m)	9.7	Sviluppo (m)	56.5
Caratterizzazione geometrica dell'edificio									
Dati di sintesi									
Rapporto S/V [m ⁻¹]	0.45	Superficie disperdente lorda totale (S) [m ²]		2983.4	Volume lordo climatizzato (V) [m ³]		6687.9		
Rapporto S _f /S _a [-]	0.13	Superficie finestrata (S _f) [m ²]		223.9	Superficie netta climatizzata (S _n) [m ²]		1692.1		
Volume netto climatizzato V _n [m ³]	5149.7								
Dati generali									
Altezza di gronda [m]	14.6	Perimetro della superficie lorda di piano [m]		139.6	Superficie lorda di piano [m ²]		524.2		
Altezza lorda volume climatizzato [m]	13.5	Superficie netta vano scala [m ²]		28.8	Superficie lorda climatizzata di piano [m ²]		495.4		
Superficie netta climatizzata di piano [m ²]	423.0	Dimensioni vano scala		larghezza [m]	2.4	profondità [m]		4.0	
Superfici disperdenti – Dati dettagliati				Fattore di corr (B _{n,ū})		Trasmittanza U [W/m ² K]		Ht [W/K]	
Superficie disperdente lorda	verso l'esterno - laterale [m ²] (comprensiva degli infissi)			1852.2	S _{lat,e}	1	1.50	2442.4	
	verso l'esterno - inferiore [m ²]			0	S _{pav,e}	1	1.80	0.0	
	verso l'esterno - superiore [m ²]			0	S _{cop,e}	1	1.80	0.0	
	verso vespaio areato [m ²]			0	S _{pav,nr,v}	0.8	1.70	0.0	
	verso cantine o garage fuori terra [m ²]			0	S _{pav,nr,ft}	0.7	1.70	0.0	
	verso piani interrati e seminterrati non riscaldati [m ²]			495.4	S _{pav,nr,it}	0.65	1.70	547.4	
	verso soffitte e sottotetti non riscaldati [m ²]			495.4	S _{cop,nr}	0.9	2.20	980.9	
	verso vani scale o altri locali non riscaldati [m ²]			140.4	S _{lat,nr}	0.5	1.70	119.3	
	verso serre (logge chiuse) [m ²]			0	S _{lat,L}	0.8	1.50	0.0	

verso altri edifici riscaldati [m ²]	0		0	0	0.0							
Superficie finestrata - esterno [m ²]	223.9	$S_{f,E}$	1	4.95	1108.4							
Superficie finestrata - logge [m ²]	0.0	$S_{f,L}$	0.8	4.95	0.0							
Superficie cassonetti - esterno [m ²]	0.0	$S_{cass,E}$	1	6.00	0.0							
Superficie cassonetti - logge [m ²]	0.0	$S_{cass,L}$	0.8	6.00	0.0							
				U_{avg}	1.92	$H_{tr,adj}$ 5198						
Dimensioni e tipologia degli infissi – Dati dettagliati												
Tipo di infisso	1	2	3	4	5	6						
Larghezza [m]	1.15	0.9	1.2	0.6								
Altezza [m]	1.8	2.3	1.8	0.6								
Infissi ombreggiati da aggetti orizzontali	no	si	no	no	no	no						
Superfici degli infissi – Dati dettagliati (valori riferiti ai soli infissi delle zone climatizzate)												
	<i>Fronte</i>			<i>Lato destro</i>			<i>Lato sinistro</i>			<i>Retro</i>		
	<i>Ovest</i>			<i>Sud</i>			<i>Nord</i>			<i>Est</i>		
Tipo infisso	1	2		1						1	4	
Numero infissi	24	24		8						48	24	
Superficie [m ²]	49.7	49.7	0.0	16.6						99.4	8.6	
Superficie cassonetto [m ²]	0.0	0.0	0.0	0.0						0.0	0.0	
Superficie infissi della facciata [m ²]	99.4			16.6						108.0		
Sup. infissi omb. $S_{f,sh,ov}$ [m ²]	49.7			0.0						0.0		
Rapporto $S_{f,sh,ov}/S_f$	50%			0%						0%		
Rapporto sup.infissi ombreggiati / sup. totale infissi ($S_{f,sh,ov}/S_f$)				22%			Sup. tot cassonetti [m ²]			0.00		

Tabella 4-5 - Foglio Excel per la raccolta e il calcolo dei parametri utili alla valutazione energetica (Parte 3 - Caratterizzazione tecnologica del sistema edificio-impianto e calcolo semplificato della prestazione energetica)

Caratterizzazione tecnologica dell'edificio														
Tecnologia costruttiva	Descrizione		Spessore medio[m]	Trasmittanza U [W/(m ² K)]										
				min	max									
Pareti esterne	Muratura portante in mattoni pieni o mattoni e pietrame non isolata (sp. 40 cm)		0.40	1.4	1.6									
Pareti verso vani non riscaldati	Muratura in mattoni pieni non isolata (sp. 25 cm)		0.25	1.7	1.7									
Copertura piana	Solaio misto con travetti prefabbricati e pignatte, non isolato (sp. 25 ÷ 30 cm)			1.7	1.9									
Solaio sottotetto	Solaio con tavelloni gettato in opera, non isolato		-	1.9	2.5									
Solaio pavimento disperdente - non risc.	Solaio con tavelloni gettato in opera, non isolato		-	1.7	1.7									
Solaio pav. disperdente - esterno o vesp.	Solaio con tavelloni gettato in opera, non isolato			1.8	1.8									
Tecnologia costruttiva degli infissi esterni	Telaio in legno con vetro singolo		Trasmittanza infisso U _w		4.9	5.0								
			Fattore solare g _{gl,n}		0.85	0.85								
Tipologia di schermature solari fisse	Aggetti dei balconi sulle portefinestre													
Tipologia di chiusure oscuranti mobili	Persiane	Incremento della resistenza termica per oscurante attivato ΔR [(m ² K)/W]		0										
Tipologia schermature mobili	Persiane	Fattore di riduzione (ggl+sh/ggl)		0.1										
Caratterizzazione tecnologica dell'impianto														
Tecnologia impiantistica riscaldamento	Descrizione		Rendimento											
			min	max										
Generazione (η _{gn,H})	caldaia a gas individuale - tipo B o C - installazione interna o esterna		0.73	0.93										
Regolazione (η _{rg,H})	termostato di caldaia o termostato di zona		0.84	0.94										
Distribuzione (η _{dh})	distribuzione separata per appartamento con isolamento delle tubazioni di tipo E (precedente all'entrata in vigore del DPR 412/93)		0.93	0.99										
Emissione (η _{e,H})	radiatori installati in parte su parete esterna non isolata e carico termico medio annuo compreso tra 4 e 10 W/m ³		0.90	0.92										
Tecnologia impiantistica ACS	Descrizione		Rendimento											
			min	max										
Generazione (η _{gn,ACS})	caldaia a gas individuale - tipo B o C - installazione interna o esterna (produzione combinata)		0.73	0.93										
Distribuzione (η _{da,ACS})	distribuzione separata per appartamento con rete affacciata all'interno		0.88	0.92										
Calcolo semplificato della prestazione energetica														
		gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic	
Q _{re,H}	[MJ]	204677	169778	140628	83542	30632	0	0	0	0	65441	132050	190753	
Q _{re,C}	[MJ]	288218	245235	224170	164388	114173	51203	13924	23670	68720	148982	212896	274295	
Q _{ve,H}	[MJ]	20276	16818	13931	8276	3034	0	0	0	0	6483	13081	18896	
Q _{ve,C}	[MJ]	28551	24293	22207	16285	11310	5072	1379	2345	6807	14758	21090	27172	
Q _{int}	[MJ]	26530	23962	26530	25674	26530	25674	26530	26530	25674	26530	25674	26530	
Q _{sol}	[MJ]	305	431	470	609	722	709	729	639	557	424	335	264	
η _{H,gn}		0.99	0.99	0.99	0.97							0.99	0.99	
η _{C,ls}					0.15	0.22	0.47	0.99	0.90	0.35	0.16			
Q _{H,nd}	[MJ]	198254	162355	127884	66449	0					0	119452	183015	
Q _{C,nd}	[MJ]	0	0	0	0	0	43	12039	3691	5	0	0	0	
Fabbisogno di energia utile per la climatizzazione invernale ed estiva														
Q _{H,nd} [kWh/m ²]		135.30				Q _{C,nd} [kWh/m ²]				2.59				

Le informazioni storiche e anagrafiche, le caratteristiche tipologiche e distributive, nonché i principali dati relativi alla volumetria climatizzata, alle superfici e alle altezze dei piani e alle dimensioni dei vani scala sono state ricavate incrociando i dati derivanti da diverse fonti informative:

- Documentazione e informazioni storiche fornite dalla Società Pistoiese di Edilizia Sociale - S.P.E.S. (Beneforti and Ottanelli, 2012) per le quali si ringrazia la Geom. Caterina Innocenti dell'Ufficio Tecnico della S.P.E.S.

- cartografia e dati WEB GIS di informazione geografica della Regione Toscana (Regione Toscana 2016);
- cartografie catastali del Comune di Pistoia, per il cui reperimento si ringrazia il Geom. Andrea Lapadula, Ufficio Tecnico dell'Agenzia delle Entrate - Ufficio Provinciale del Territorio di Firenze;
- Fotografie aeree da Google Maps (<https://www.google.it/maps>) e Microsoft Bing (<https://www.bing.com/>);
- Rilievi fotografici degli edifici.

Nei casi di assenza di dati planimetrici più precisi il volume netto climatizzato e la superficie netta climatizzata sono stati ricavati secondo le modalità indicate al punto 7.4 della norma UNI/TS 11300-1:2014 (Ente Nazionale Italiano di Unificazione - UNI, 2014a) e punto 12.3 della UNI/TS 11300-1:2008 (Ente Nazionale Italiano di Unificazione - UNI, 2008b).

Le dimensioni delle superfici di involucro vetrate (finestre, portefinestre o verande) sono state desunte dal rilievo fotografico tramite tecniche di raddrizzamento per via geometrica mediante il software RDF del Laboratorio di Fotogrammetria CIRCE dell'Università IUAV di Venezia.

Le caratteristiche costruttive degli elementi tecnici costituenti l'involucro edilizio opaco e trasparente sono state identificate tramite l'analisi della documentazione dell'archivio IACP/SPES, quando disponibile, oppure tramite sopralluogo e rilievo fotografico. È stata inoltre verificata la coerenza dei dati desunti dalla suddetta documentazione e dalle osservazioni fatte rispetto a:

- studi analitici sulle caratteristiche costruttive di diversi quartieri INA CASA realizzati dal 1949 al 1963 in tutta Italia (Bardelli et al., 2003; Nuti, 2004);
- studi CRESME che riportano la diffusione delle diverse tecnologie nell'edilizia residenziale realizzata a cavallo fra gli anni '60 e '70 (Chiesa, 1964; Centro ricerche economiche, sociologiche e di mercato nell'edilizia, 1966, 1971).

Non essendo possibile procedere a misurazioni in opera delle prestazioni termiche delle strutture opache e trasparenti costituenti l'involucro edilizio degli edifici campionati, i valori di trasmittanza termica necessari per la valutazione energetica preliminare sono stati attribuiti sulla base dei valori tipici riportati nella letteratura di riferimento. In particolare sono stati presi in considerazione gli abachi TABULA (vedi paragrafo 4.4.1)

e la norma UNI/TR 11552:2014 che riporta i parametri termofisici di numerosi tipi di strutture costituenti l'involucro opaco degli edifici. (Ente Nazionale Italiano di Unificazione - UNI, 2014c). Per quanto riguarda gli infissi sono stati considerati sia i valori forniti nella documentazione di TABULA che i valori tipici riportati nell'Appendice B della norma UNI/TS 11300-1:2014 (Ente Nazionale Italiano di Unificazione - UNI, 2014a). Quest'ultimo riferimento è stato impiegato per il reperimento dei parametri di trasmissione e riflessione solare delle superfici vetrate, delle schermature solari mobili, nonché per il valore di resistenza termica aggiuntiva dovuta alla presenza di elementi oscuranti gli infissi.

Nella fase di definizione dell'intervallo dei più probabili valori di trasmittanza termica si è, inoltre tenuto conto che INA CASA a partire dal 1956 e GESCAL a partire dal 1963 abbiano introdotto limiti minimi di resistenza termica per le strutture dell'involucro edilizio degli edifici finanziati (INA-CASA, n.d.; GESCAL - Gestione case per lavoratori, 1965).

La medesima metodologia è stata impiegata per l'attribuzione dei valori di rendimento energetico dei sottosistemi dell'impianto di riscaldamento e di produzione di acqua calda sanitaria. In questo caso i riferimenti sono costituiti dagli abachi del Progetto TABULA (vedi paragrafo 4.4.1) e dai prospetti da 17 a 28 della norma UNI/TS 11300-2:2014 (Ente Nazionale Italiano di Unificazione - UNI, 2014b).

Ai fini della caratterizzazione energetica degli edifici campionati sono stati calcolati i seguenti indicatori:

- Indice di prestazione termica utile (fabbisogno riferito al solo involucro edilizio) per la climatizzazione invernale ($EP_{H,nd}$) [kWh/m^2], ed estiva ($EP_{C,nd}$) [kWh/m^2];
- Area solare equivalente³⁹ ($A_{sol,est}$) [m^2];
- Coefficiente medio globale di scambio termico⁴⁰ (H'_T) [W/m^2K].

³⁹ indicatore introdotto dal recente D.M 26/06/2015 "Requisiti Minimi" e calcolato come sommatoria delle aree equivalenti estive di ogni componente vetrato, tenendo conto dei fattori di correzione per la presenza di ombreggiamenti esterni, schermature, presenza del telaio e irraggiamento incidente.

⁴⁰ indicatore introdotto dal recente D.M 26/06/2015 "Requisiti Minimi" e calcolato come rapporto tra il coefficiente globale di scambio termico per trasmissione dell'involucro e la sommatoria delle superfici dei componenti opachi e trasparenti.

La valutazione energetica preliminare finalizzata al calcolo degli indici $Q_{H,nd}$ e $Q_{C,nd}$ è stata effettuata sulla base delle procedure di calcolo della UNI/TS 11300-1:2014 (valutazione energetica standard: procedura di riferimento per la certificazione energetica degli edifici) adottando alcune semplificazioni di calcolo:

- L'edificio è stato considerato come costituito un'unica zona termica;
- I ponti termici sono considerati ininfluenti secondo quanto indicato al punto G.2 della UNI EN ISO 13790:2008 (UNI - Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 2008b) in quanto la trasmittanza termica media della parte opaca dell'involucro ($U_{op,mn}$) di tutti gli edifici censiti supera il valore di $0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$;
- Non sono stati considerati gli effetti degli apporti termici sui componenti opachi;
- Non è stato considerato l'extra-flusso termico dovuto allo scambio radiativo fra i componenti d'involucro e la volta celeste;
- In assenza di dati dettagliati sulle superfici delle partizioni interne degli edifici considerati, il valore della capacità termica interna, necessario per la determinazione dei fattori di utilizzazione degli apporti gratuiti e delle dispersioni gratuite, è stato determinato secondo la metodologia semplificata di cui al prospetto 12 della norma UNI EN ISO 13790:2008 (UNI - Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 2008b);
- In assenza di dati dettagliati, lo scambio termico per trasmissione verso gli ambienti non riscaldati (H_U) e verso il terreno (H_g) è stato calcolato considerando i fattori di correzione ($b_{tr,U}$) riportati nel prospetto 7 della UNI/TS 11300-1:2014.

4.4.3 Consistenza e caratteristiche del patrimonio edilizio di studio

Mediante l'elaborazione e l'analisi dei dati raccolti e calcolati nelle schede Excel di censimento è stato possibile elaborare un profilo statistico delle caratteristiche del patrimonio edilizio di riferimento. Il campione è composto da 1611 alloggi distribuiti in 145 edifici, di cui 67 progettati fra il 1946 e il 1960. Fra questi ultimi prevalgono nettamente quelli caratterizzati da struttura in muratura portante in mattoni pieni e mattoni e pietrame (82%). Gli altri 78 edifici sono stati progettati fra il 1961 e il 1977 e presentano tutti struttura portante in telaio di c.a. con tamponamenti in muratura di mattoni a cassavuota (Figura 4-59 a).

Dal punto di vista tipologico, il 27% degli edifici censiti appartengono alla tipologia della "casa in linea isolata" (edificio costituito da un unico modulo generatore della

tipologia in linea) (Figura 4-60 a), il 48% alla tipologia della “casa in linea continua” (Figura 4-60 b) con diversi schemi aggregativi e il 25% alla tipologia “a palazzina” (Figura 4-60 c) con un unico vano scala che distribuisce più di due alloggi per piano. Complessivamente la tipologia in linea rappresenta il 75% del totale (Figura 4-59 b). Le tipologie a “casa in linea isolata” e a “palazzina” sono distribuite piuttosto uniformemente fra i due periodi storici considerati, con una leggera prevalenza del periodo 1946-1960. La tipologia della “casa in linea continua” è invece prevalente nel secondo periodo.

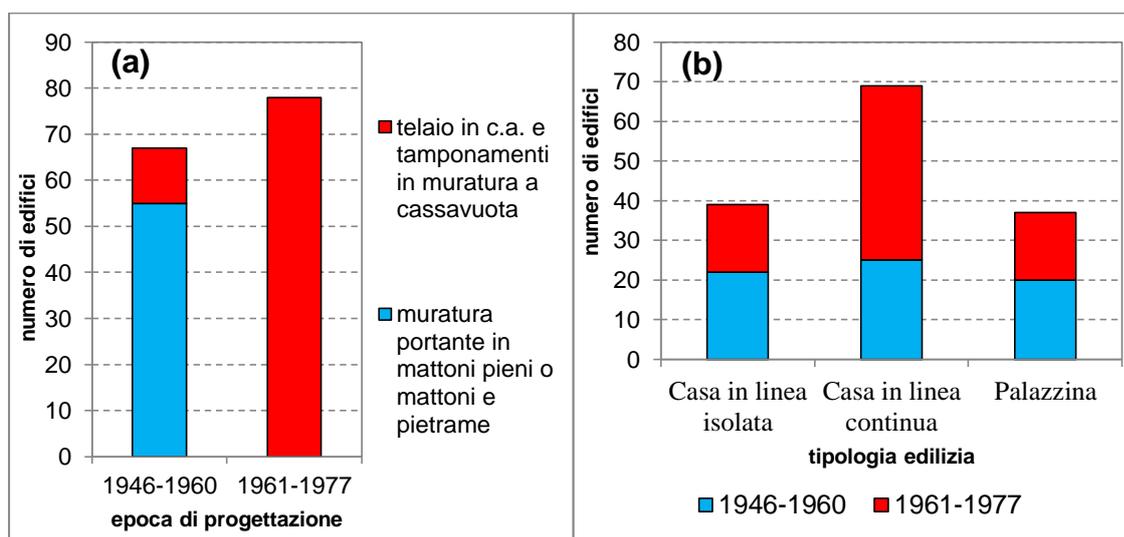


Figura 4-59 – Distribuzione degli edifici per periodo di costruzione e per tecnologia costruttiva (a). Distribuzione degli edifici per tipologia architettonica e periodo di progettazione (b)



Figura 4-60 - Esempi di tipologie a “casa in linea isolata” (a), “casa in linea continua” (b), “palazzina” (c)

La Figura 4-61 mostra come il 70% degli edifici campionati ospiti un numero di alloggi compreso fra 5 e 15 e il 23% degli edifici superiori i 15 alloggi. Considerando la distribuzione del numero degli alloggi si evidenzia come il 78% di questi sia collocato in edifici con più di 8 unità immobiliari. Si può inoltre vedere come la maggior parte degli edifici di medie dimensioni (da 9 a 15 alloggi) sia stato progettato nel primo

periodo storico (1946-1960), mentre per gli edifici di piccole (fino a 8 alloggi) o grandi dimensioni (più di 15 alloggi) prevale il periodo di progettazione 1961-1977.

Dalla Figura 4-62 si può osservare come la maggior parte degli edifici (83% e 86% considerando il numero degli alloggi) presentino un numero di piani fuori terra compreso fra 3 e 4 e un numero di vani scala compreso fra 1 e 2 (86% e 74% considerando il numero degli alloggi)

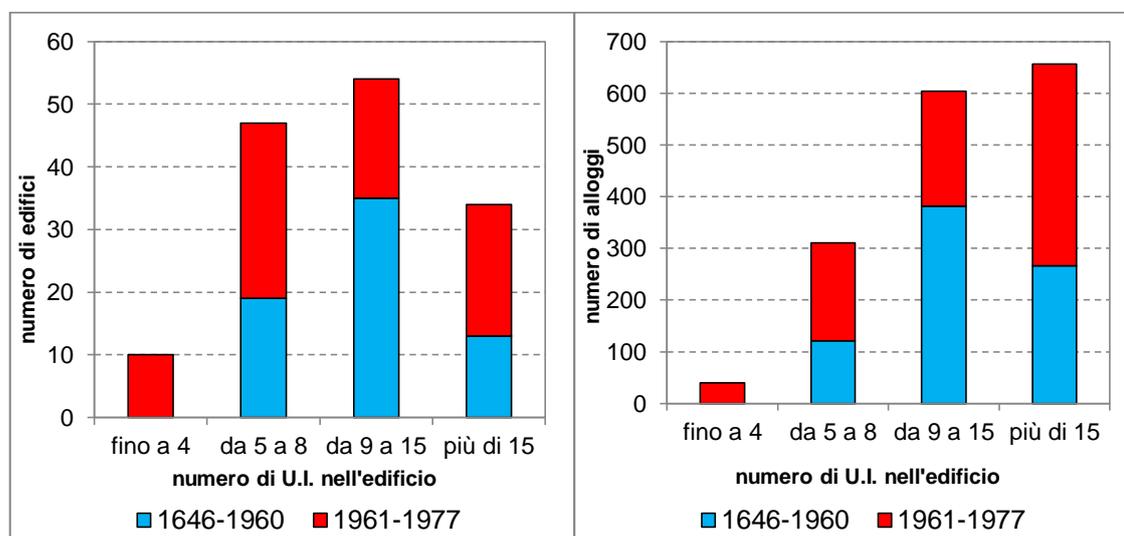


Figura 4-61 – Distribuzione degli edifici (a) e degli appartamenti (b) per numero di unità immobiliari presenti nell'edificio e per periodo di progettazione

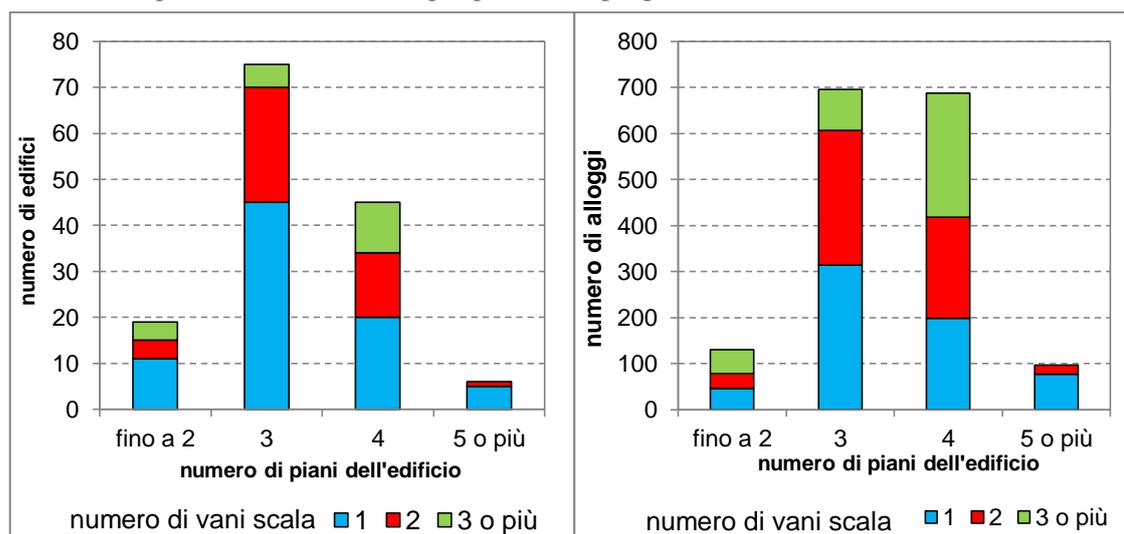


Figura 4-62 – Distribuzione degli edifici (a) e degli appartamenti (b) per numero di piani dell'edificio e numero di vani scala

Per quanto riguarda la dotazione impiantistica, con riferimento alle macro categorie impianto di riscaldamento centralizzato e autonomo, gli edifici appartenenti al campione di studio presentano una netta prevalenza della seconda tipologia (81% contro 19%) con la diffusione minima per gli impianti centralizzati nel primo periodo (1946-60) e una

maggior concentrazione nel secondo periodo (1961-1978) come mostrato in Figura 4-63.

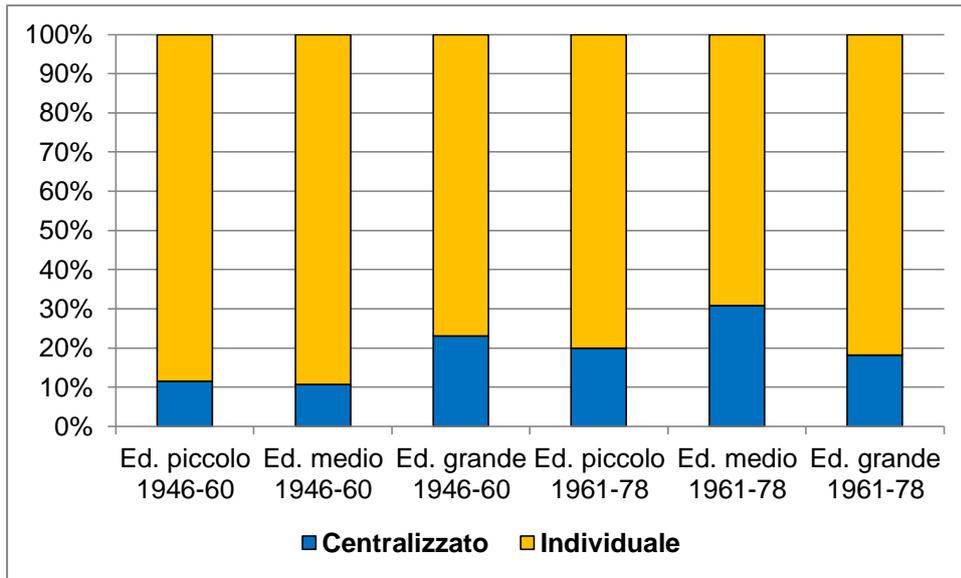


Figura 4-63 – Distribuzione percentuale delle tipologie di impianto di riscaldamento (centralizzato o individuale) per classe di edifici

Tali risultati se confrontati con i dati statistici del 15° Censimento ISTAT della Popolazione e delle Abitazioni e con le analisi CRESME presentate (paragrafo 4.1) confermano il campione di studio selezionato presenti caratteristiche dimensionali e tipologiche congruenti con le proprietà del patrimonio edilizio residenziale nazionale. Su questa base è possibile considerare gli edifici residenziali pubblici costruiti a Pistoia fra il 1946 e il 1977, pur nella limitatezza numerica del campione, come rappresentativi delle caratteristiche degli edifici residenziali plurifamiliari costruiti in Italia nel secondo dopoguerra. Questo approccio metodologico consente di estendere gli esiti della ricerca, oltre il contesto geografico di riferimento, a realtà climatiche nazionali caratterizzate da condizioni mediterranee, al fine di ottenere indicazioni progettuali il cui impatto in termini di riduzione delle emissioni GHG sia rilevante.

Come si può vedere dalla Tabella 4-6, l'orientamento del fronte principale degli edifici censiti è distribuito in modo regolare fra Sud, Est e Ovest con un'incidenza minore per quanto riguarda il Nord.

Tabella 4-6 – Distribuzione degli edifici censiti per orientamento della facciata

Orientamento	n. di edifici	distribuzione percentuale
Nord	27	19%
Est	41	28%
Sud	39	27%
Ovest	38	26%

Per quanto riguarda le superfici finestrate dall'analisi statistica risulta che passando dal primo periodo analizzato (1946-1960) al secondo (1961-1977) si ha un incremento del rapporto superficie finestrata/superficie utile che passa da 0,155 a 0,181.

In Figura 4-64, si riporta la diffusione delle due tipologie di chiusure oscuranti (persiana in plastica, legno o metallo o avvolgibile in plastica o legno) per ciascuna dimensione edilizia e epoca di costruzione. Si rileva la maggiore diffusione dell'avvolgibile, che nel secondo periodo (1961-1978) caratterizza la totalità degli edifici censiti. La persiana è presente esclusivamente nel primo periodo (1946-60) anche se in misura minoritaria rispetto all'avvolgibile e in quantità decrescente all'aumentare della dimensione dell'edificio.

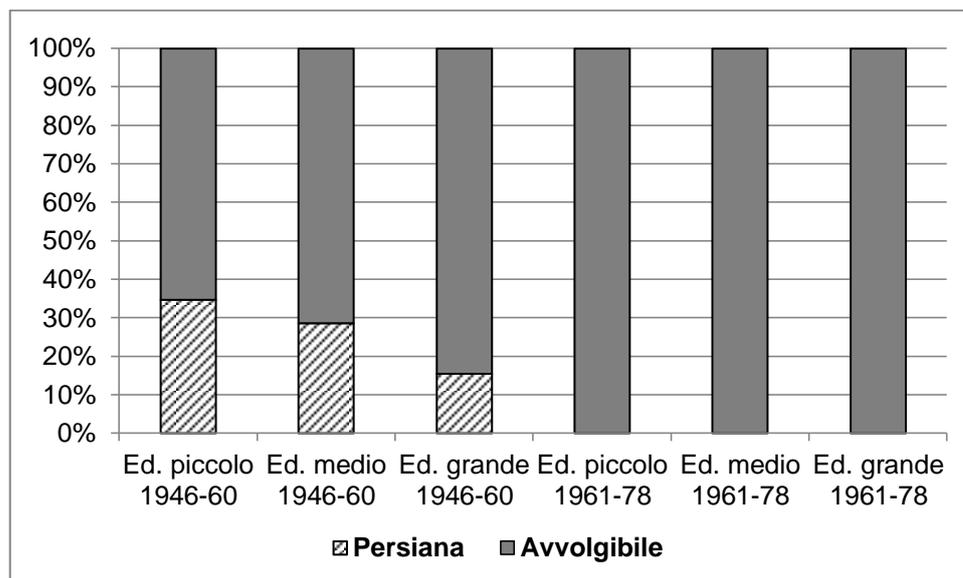


Figura 4-64 - Distribuzione percentuale delle tipologie di chiusura oscurante (persiana o avvolgibile) per classe di edifici

Nella Figura 4-65 è riportata la percentuale di edifici in cui sia stata rilevata la presenza di logge chiuse (verande), presenti nell'edificio fin dalla costruzione, oppure, più frequentemente, aggiunte in seguito chiudendo con infissi metallici con vetro singolo alcune logge aperte o terrazze di servizio come nell'esempio riportato in Figura 4-66.

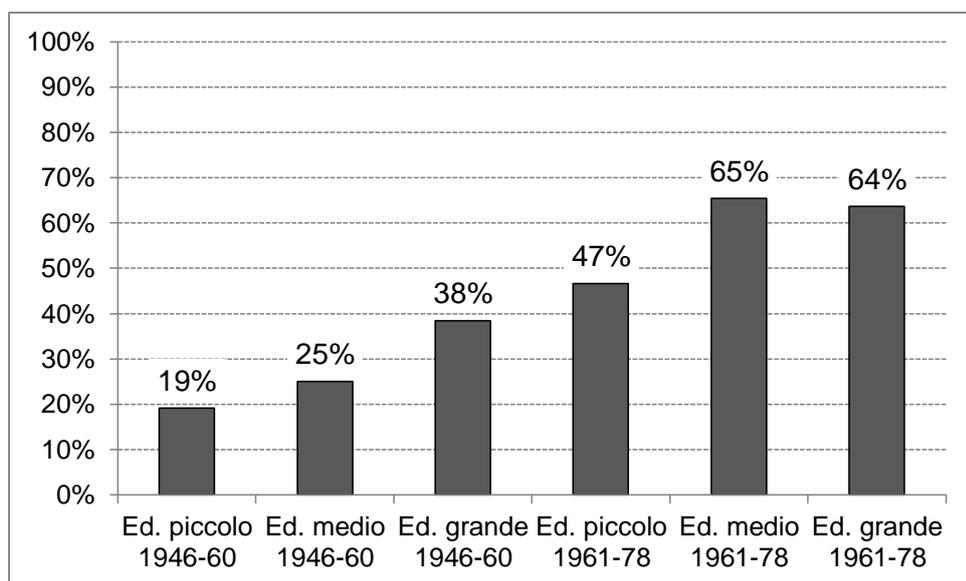


Figura 4-65 – Percentuale di edifici con presenza di logge chiuse successivamente all'edificazione.



Figura 4-66 – Esempio di edificio le cui logge sono state chiuse successivamente alla costruzione formando delle verande

4.4.4 Matrice Tipologica

A partire dall'analisi statistica delle caratteristiche del patrimonio edilizio di studio, la metodologia descritta nel Progetto TABULA (paragrafo 4.4.1) è stata assunta, con i necessari aggiustamenti, come riferimento per l'elaborazione della Matrice Tipologica degli edifici-tipo rappresentativi.

Per quanto riguarda la definizione delle classi di epoca storica, gli aggiustamenti effettuati rispetto allo schema di TABULA hanno tenuto conto sia del fatto che le

caratteristiche energetiche degli edifici sono influenzate dalla legislazione vigente al momento della richiesta del titolo abilitativo, sia del fatto che il lasso di tempo che può trascorrere tra redazione del progetto e realizzazione dell'intervento può essere anche di qualche anno. In considerazione di ciò, come parametro di riferimento è stato scelto l'anno di progettazione e non l'anno di costruzione.

Il campione di edifici è stato pertanto suddiviso in due epoche storiche caratterizzate da diverse tecnologie costruttive:

- **1° periodo: 1946 – 1960**, nel quale ricadono 67 edifici su 145;
- **2° periodo: 1961 – 1977**, nel quale ricadono 78 edifici su 145.

Al fine di individuare i confini delle classi di epoca storica è stata analizzata (Figura 4-67) la diffusione delle diverse tecnologie costruttive del campione di studio nel periodo 1946-1977 e, coerentemente con quanto stabilito nella metodologia di TABULA, è stato individuato il 1960-1961 come biennio di transizione fra tecnologia a muratura portante e a telaio in c.a. Tale dato risulta coerente con i dati ISTAT sulle caratteristiche del patrimonio edilizio nazionale presentati nel paragrafo 4.1. Il limite superiore del 2° periodo è stato spostato dal 1975, proposto da TABULA, a tutto il 1977 in ragione del fatto che la Legge 373/76 che ha introdotto i primi obblighi progettuali relativi al contenimento dei consumi energetici è stata attuata solo a partire dai primi mesi del 1978 con l'entrata in vigore del D.M. 10 marzo 1977.

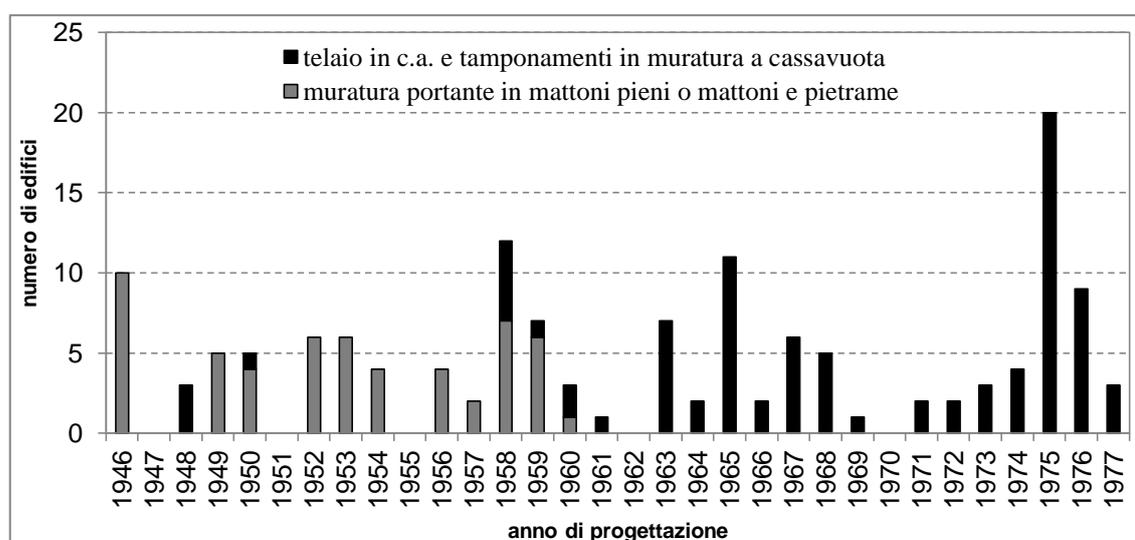


Figura 4-67 – Distribuzione degli edifici analizzati per anno di progettazione e tecnologia costruttiva

Per quanto riguarda la suddivisione del campione in classi di dimensione edilizia, è stata in parte rivista la classificazione di TABULA basata sulla tipologia edilizia (edificio monofamiliare e a schiera) e sulla dimensione edilizia (edificio multifamiliare

e blocco di appartamenti individuati in base alla combinazione fra numero di alloggi e numero di piani). Dovendo, infatti, classificare un campione omogeneo dal punto di vista tipologico in quanto composto da edifici esclusivamente plurifamiliari e prevalentemente in linea, non sono state considerate le classi della casa monofamiliare e della schiera e si è fatto riferimento esclusivamente al criterio dimensionale. Per questo, a partire dallo studio della letteratura sull'influenza dei parametri geometrici e tipologici sulla prestazione energetica degli edifici (Cellai et al., 2003; Caldera et al., 2008; Filippín et al., 2013; Zhao et al., 2015; Arambula Lara et al., 2015), si è analizzata la correlazione fra prestazione energetica degli edifici campionati e diversi parametri dimensionali fra cui: numero di unità immobiliari e numero di piani (parametri impiegati in TABULA per la classificazione dimensionale), volume lordo climatizzato (V), volume netto climatizzato (V_n), superficie utile climatizzata (S_u), superficie disperdente verso esterno o ambienti non climatizzati (S), superficie laterale esterna ($S_{lat,e}$). Fra questi il Volume lordo climatizzato (V), al pari della Superficie utile (S_u), presenta, un buon coefficiente di correlazione lineare⁴¹ (ρ_{XY}) con l'indice di prestazione termica utile per la climatizzazione invernale ed estiva ($EP_{H,nd} + EP_{C,nd}$) (Figura 4-68).

Fra i due parametri è stato scelto di utilizzare il Volume lordo climatizzato (V) in quanto rilevabile con maggiore facilità e affidabilità anche a partire dai dati GIS disponibili sul portale WEBGIS della Regione Toscana.

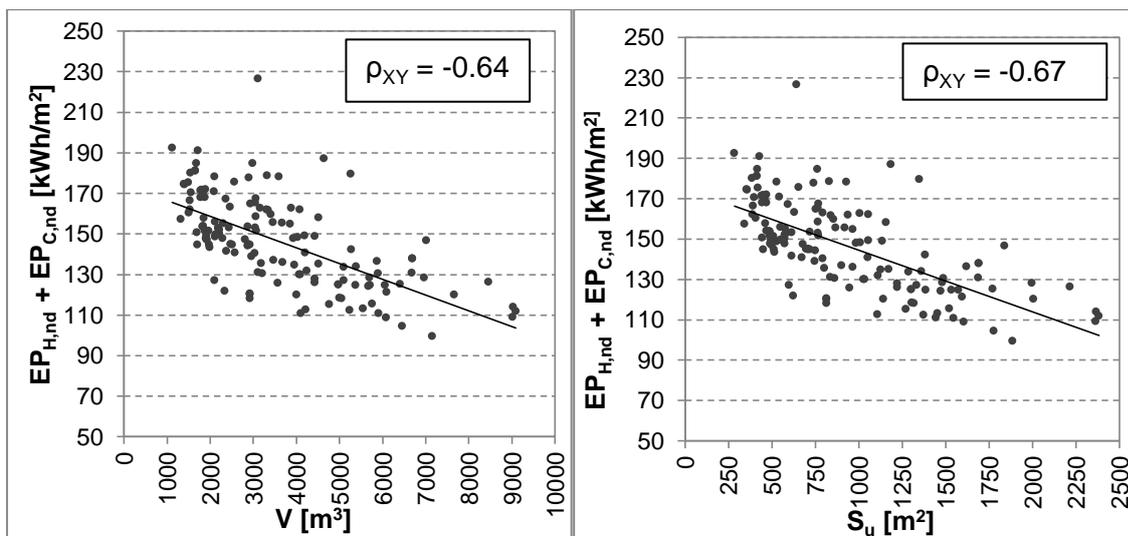


Figura 4-68 –Correlazioni fra volume lordo climatizzato V (a), Superficie utile netta S_u (b) e fabbisogno totale di energia utile per la climatizzazione ($Q_{H,nd} + Q_{C,nd}$)

⁴¹ Indice che misura il grado di relazione lineare tra due variabili (Fonte: Glossario ISTAT - <http://www3.istat.it/servizi/studenti/binariodie/CorsoExcel/Glossario.htm>)

I parametri presi in considerazione per la suddivisione del patrimonio edilizio di riferimento sono coerenti con i criteri stabiliti dalle indicazioni europee (Commissione Europea, 2012) che elencano l'età, la dimensione e le condizioni climatiche come aspetti principali di cui tenere conto.

Il volume lordo climatizzato degli edifici campionati presenta un valore minimo di 1112.7 m³ e un massimo di 9091.7 m³ con un valore medio (M) di 3578.9 m³, una mediana di 3060.8 m³ una deviazione standard (σ)⁴² di 1808.7 m³.

Considerando che la distribuzione statistica del parametro volume lordo climatizzato (V) presenta un andamento multimodale (Figura 4-69), si è optato per portare il numero delle suddivisione del campione di edifici plurifamiliari da due (TABULA : edificio multifamiliare e blocco di appartamenti) a tre.

I valori di soglia degli intervalli delle classi dimensionali sono stati determinati sulla base di M e di una frazione⁴³ di σ mediante la formula:

$$\text{Valore di soglia} = M \pm (\sigma/2) \quad [1]$$

I valori di soglia individuati sono stati aggiustati per avvicinare le interruzioni naturali e ottimizzare la distribuzione degli edifici nelle diverse classi, giungendo ai valori di 2700 m³ e 4800 m³ (Figura 4-70).

⁴² La deviazione standard (σ) indica il grado di dispersione di un insieme di valori rispetto al valore medio M ed è altrimenti nota come la radice quadrata della media dei quadrati delle deviazioni:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x^i - M)^2}{N}} \quad \text{dove } x^i \text{ è il valore } i\text{-esimo del parametro in esame e } N \text{ il numero dei parametri.}$$

⁴³ σ può essere divisa per tentativi per valori diversi da 2 ovvero per 3,4 ecc., in modo da ottenere i valori di soglia che più si avvicinano alle interruzioni naturali individuabili mediante l'osservazione del grafico con le interruzioni naturali da grafico per conferma.

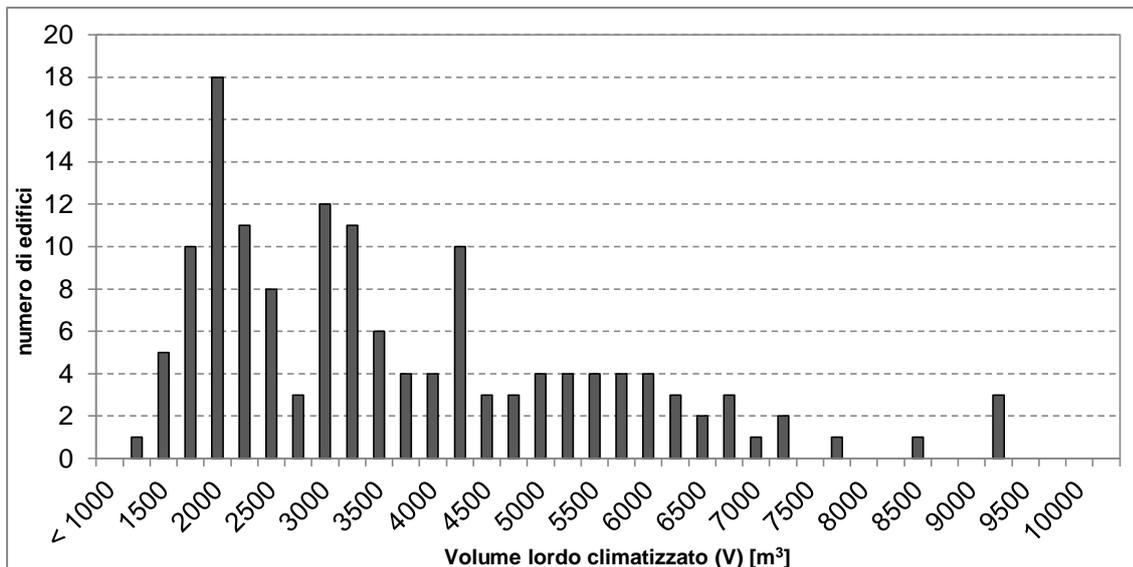


Figura 4-69- Distribuzione del numero di edifici per volume lordo climatizzato (V)

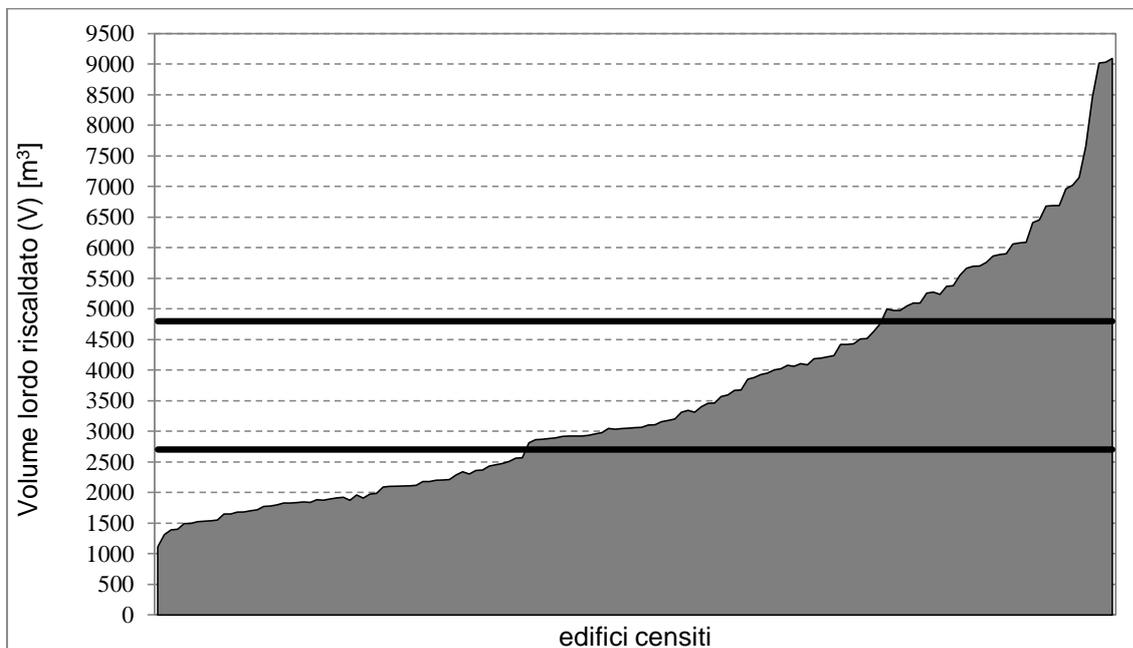


Figura 4-70 – Volume lordo climatizzato degli edifici censiti e valori soglia per la classificazione della dimensione edilizia degli edifici

Inoltre sfruttando la correlazione lineare esistente fra volume lordo riscaldato e numero di unità immobiliari (Figura 4-71) i valori di soglia individuati sono stati associati al corrispondente numero di unità immobiliari. In particolare sono stati fissati in modo che il volume calcolato corrispondesse alle soglie ISTAT di 8 e 15 alloggi, giungendo alla definizione delle tre seguenti classi di dimensione edilizia:

1. **Edificio plurifamiliare piccolo:** $V \leq 2700 \text{ m}^3$; $nUI \leq 8$
2. **Edificio plurifamiliare medio:** $2700 \text{ m}^3 < V < 4800 \text{ m}^3$; $8 < nUI \leq 15$

3. Edificio plurifamiliare grande: $V \geq 4800 \text{ m}^3$; $nUI > 15$

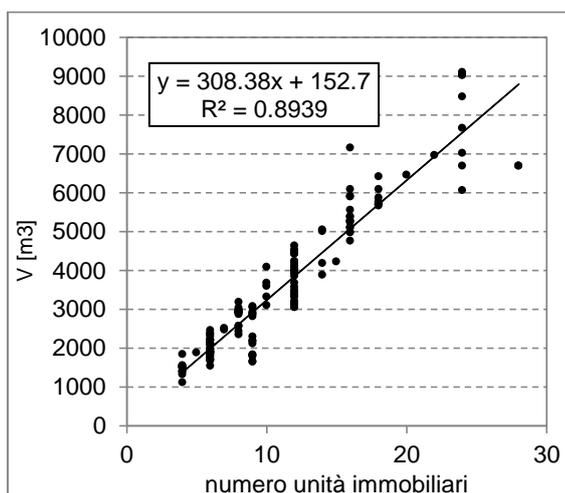


Figura 4-71 – Correlazione fra volume lordo climatizzato (V) e numero di unità immobiliari

Applicando al patrimonio analizzato il metodo di classificazione della dimensione edilizia adottato da TABULA (vedi paragrafo 4.4.1) e confrontandolo con il metodo adottato in questa ricerca si rileva una sostanziale uniformità degli esiti per cui :

- le classi “edificio plurifamiliare piccolo” e “edificio plurifamiliare medio” sono confrontabili con la classe di TABULA “edificio multifamiliare”;
- la classe “edificio plurifamiliare grande” è confrontabile con la classe di TABULA “blocco di appartamenti”;
- L’unica differenza è costituita dalla ulteriore divisione della classe “edificio multifamiliare” in due sottoclassi. Questo rende inoltre la classificazione maggiormente coerente con quella adottata dell’ISTAT nel 15° Censimento della Popolazione e delle Abitazioni del 2011 (ISTAT 2016).

Incrociando le due classificazioni individuate (epoca di progettazione e volume lordo climatizzato) si perviene alle 6 classi riportate in Tabella 4-7.

Tabella 4-7 – Numero di edifici per ciascuna classe della Matrice Tipologica

<i>Nome classe</i>	<i>Periodo storico</i>	<i>Dimensione edilizia</i>	<i>Numero di edifici</i>
1.1	1946 – 1960 (1)	1. Ed. Piccolo	26
1.2		2. Ed. Medio	28
1.3		3. Ed. Grande	13
2.1	1961-1977 (2)	1. Ed. Piccolo	30
2.2		2. Ed. Medio	26
2.3		3. Ed. Grande	22

Al fine di assegnare a ciascuna delle classi individuate un edificio-tipo, adeguatamente caratterizzato sia dal punto di vista tipologico/geometrico che costruttivo/impiantistico, fra i diversi approcci metodologici individuati in TABULA, è stato adottato quello denominato “**SyAv – SyAv**”. Questo metodo che prevede di utilizzare edifici-tipo non reali (archetipi) caratterizzati da parametri geometrici e tecnologici, determinati statisticamente e coincidenti con i valori medi assunti dal campione di riferimento e caratterizzato da una tecnologia costruttiva e impiantistica definita tipica mediante analisi statistica (vedi paragrafo 4.4.1). Per quanto riguarda la tecnologia impiantistica, il criterio statistico (SyAv) è stato impiegato solo per l’individuazione della macro-tipologia (impianto centralizzato o individuale con produzione separata dell’acqua calda sanitaria). La mancanza di dati relativi alle caratteristiche dei sotto-sistemi (ad es. la tipologia di regolazione o di distribuzione) ha reso necessario individuare questi parametri mediante l’esperienza, con l’aiuto degli abachi TABULA descritti in precedenza.

La definizione degli edifici-tipo ha, quindi, previsto i seguenti passaggi applicativi:

- Il volume lordo climatizzato di ciascun edificio-tipo corrisponde al valore medio del volume lordo climatizzato di ciascun sotto gruppo;
- La superficie utile di piano, l’altezza di piano, le dimensioni dei vani scala, il loro numero e il numero di piani fuori terra sono stati definiti sulla base del corrispondente valore medio di ciascuna classe;
- I valori da attribuire ai parametri “superficie disperdente verso l’esterno e verso ambienti non riscaldati (S)” e “superficie finestrata (S_f)” sono stati fissati sulla base delle analisi di regressione statistica riportate nella Figura 4-72, nella Figura 4-73e nella Figura 4-74 che mostrano una dipendenza lineare di tali parametri rispetto al Volume lordo riscaldato (V) e alla superficie utile (S_u) a loro volta strettamente correlati ($R^2 = 0,99$). In pratica si è potuto considerare i

rapporti S/V , S_u/V , S_f/S_u e S_f/V ⁴⁴ come invarianti tipologiche del campione analizzato⁴⁵;

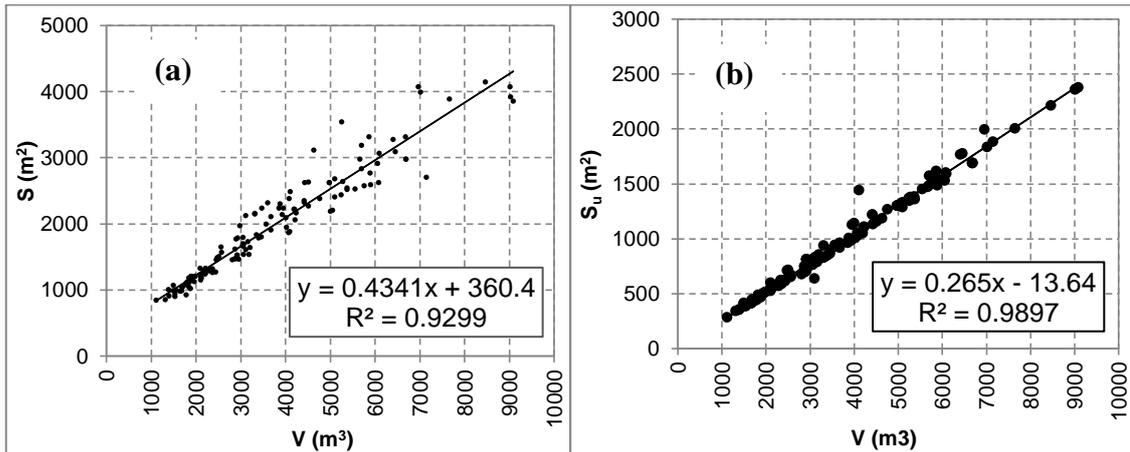


Figura 4-72 – Correlazione statistica fra e volume lordo climatizzato (V) e superficie disperdente (S) (a) e fra volume lordo climatizzato (V) e superficie utile (S_u) (b)

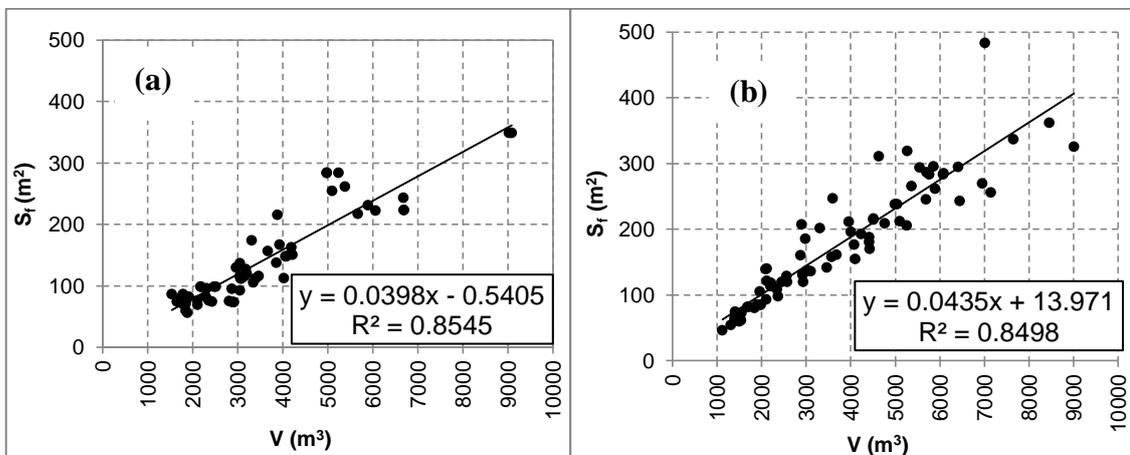


Figura 4-73 - Correlazione statistica fra volume lordo climatizzato (V) e superficie finestrata (S_f) nel primo periodo 1946-1960 (a) e nel secondo periodo 1961-1977 (b)

⁴⁴ Le correlazioni riguardanti la superficie finestrata (S_f) sono state analizzate distinguendo i due periodi storici considerati (1946-60 e 1961-77) in ragione della diversa incidenza degli infissi sulla superficie di involucro totale (vedi paragrafo 4.4.3)

⁴⁵ I rapporti S/V e S_f/S_u influiscono in modo decisivo sulla prestazione energetica e ambientale dell'edificio (dispersioni di calore attraverso l'involucro e apporti solari attraverso le superfici trasparenti), tant'è che precedentemente all'entrata in vigore del D.M. 26/6/2015, il parametro S/V era impiegato nella legislazione nazionale per individuare i limiti minimi di prestazione energetica per le nuove costruzioni e il rapporto fra S_f e S_u è utilizzato nel D.M 5/7/75 per determinare la superficie finestrata minima.

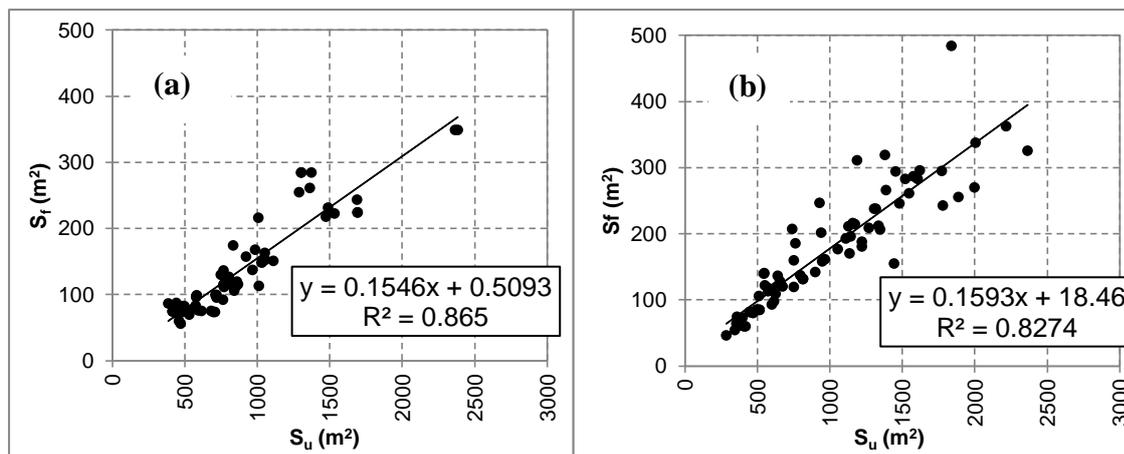


Figura 4-74 - Superficie finestrata (S_f) e Superficie utile (S_u) nel primo periodo 1946-1960 (a) e nel secondo periodo 1961-1977 (b)

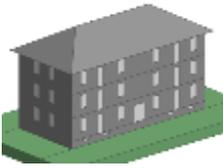
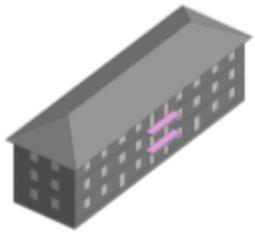
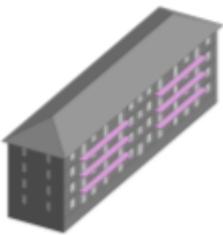
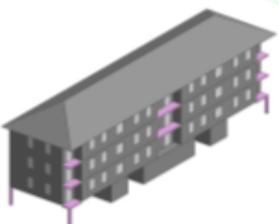
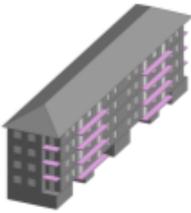
- La caratterizzazione geometrica degli edifici-tipo è stata perfezionata estrapolando dall'analisi i valori medi delle superfici disperdenti verso ambienti non climatizzati suddivisi per tipologia di ambiente confinante (sottotetto, soffitta, pavimento su pilotis, pavimento su terreno) nonché la distribuzione della superficie finestrata ombreggiata e non ombreggiata (da aggetti verticali e orizzontali) sulle diverse facciate⁴⁶. Si è inoltre tenuto conto della presenza percentuale delle logge chiuse sul numero di edifici totale e delle loro dimensioni medie;
- Gli edifici-tipo sono stati infine modellati geometricamente cercando di avvicinarsi quanto più possibile ai valori obiettivo individuati con l'analisi statistica descritta sopra. Utilizzando V , S/V , S_u e S_f come parametri di controllo per valutare le differenze fra edificio-tipo modellato e parametri ideali si sono ottenuti scarti medi dell'1% con valori massimi contenuti entro il 2%;
- La tipologia costruttiva dell'involucro, degli elementi finestrati e dei sistemi oscuranti e i corrispondenti valori di trasmittanza termica e solare (U e $g_{gl,n}$), di fattore di assorbimento solare (α), nonché le macro-tipologie impiantistiche (centralizzato o individuale con produzione separata dell'acqua calda sanitaria) sono stati assegnati sulla base dei valori più ricorrenti (moda statistica) all'interno delle classi della Matrice Tipologica.

⁴⁶ L'impatto degli ombreggiamenti è uno degli aspetti da tenere in considerazione per la definizione degli edifici -tipo ai sensi delle indicazioni europee per il calcolo dei livelli costo-ottimali di prestazione energetica (Commissione Europea, 2012).

Occorre mettere in evidenza come, al contrario dell'involucro opaco che non ha subito interventi di efficientamento, la maggior parte degli infissi originali, in legno e vetro semplice, o sono stati sostituiti nel tempo con infissi in legno e vetro camera normale o sono stati accoppiati a infissi esterni con telaio in metallo senza taglio termico e con vetro camera normale. Analoga considerazione deve essere fatta per i generatori di calore originali che nel corso degli anni sono stati sostituiti da modelli tecnologicamente aggiornati e più efficienti.

Sulla base di questa procedura e coerentemente con le consistenze e caratteristiche del patrimonio edilizio oggetto di studio riportate nel paragrafo 4.4.3 sono state elaborate la Matrice Tipologica riportata in Tabella 4-8 e la matrice delle tipologie costruttive e impiantistiche riportata in Tabella 4-10.

Tabella 4-8 – Matrice Tipologica del campione edilizio analizzato con i modelli di edificio-tipo e i parametri geometrici che li caratterizzano

		CLASSE DI DIMENSIONE		
		Ed. multifamiliare Piccolo Volume $\leq 2700 \text{ m}^3$ Unità imm. ≤ 8	Ed. multifamiliare Medio $2700 \text{ m}^3 < \text{Volume} < 4800 \text{ m}^3$ $8 < \text{Unità imm.} \leq 15$	Ed. multifamiliare Grande Volume $\geq 4800 \text{ m}^3$ Unità imm. > 15
EPOCA STORICA	1946 - 1960	Tipo 1.1	Tipo 1.2	Tipo 1.3
				
		n. unità imm.=6 Su =496.2 m ² Vn=1488.6 m ³ S=1181.1 m ³ V=1987.0 m ³ S/V=0.60 m ⁻¹ Sf=79.1 m ² Sf/Su=0.16	n. unità imm.=12 Su =872.4 m ² Vn=2617.2 m ³ S=1845.2 m ³ V=3428.2 m ³ S/V=0.54 m ⁻¹ Sf=129.6 m ² Sf/Su=0.15	n. unità imm.=24 Su =1618.8 m ² Vn=4856.4 m ³ S=2966.9 m ³ V=6293.7 m ³ S/V=0.47 m ⁻¹ Sf=266.0 m ² Sf/Su=0.16
	1961 - 1977	Tipo 2.1	Tipo 2.2	Tipo 2.3
				
		n. unità imm.=6 Su =485.7 m ² Vn=1457.1 m ³ S=1166.8 m ³ V=1893.1 m ³ S/V=0.61 m ⁻¹ Sf=89.7 m ² Sf/Su=0.18	n. unità imm.=12 Su =954.3 m ² Vn=2862.9 m ³ S=2146.9 m ³ V=3697.5 m ³ S/V=0.58 m ⁻¹ Sf=176.4 m ² Sf/Su=0.18	n. unità imm.=16 Su =1633.2 m ² Vn=4899.6 m ³ S=3130.1 m ³ V=6201.9 m ³ S/V=0.50 m ⁻¹ Sf=286.4 m ² Sf/Su=0.18

Le planimetrie degli edifici-tipo della Matrice sono riportati nel punto 2 degli Allegati “Planimetrie degli Edifici-Tipo”,

Nella Tabella 4-9 sono riportati i limiti di rappresentatività e applicabilità dei suddetti edifici-tipo, desunti dall'analisi statistica effettuata sul campione di studio (correlazioni mostrate in precedenza):

Tabella 4-9 – Limiti di validità rappresentativa della Matrice Tipologica

<i>edificio-tipo</i>	<i>Volume lordo riscaldato – V (m³)</i>	<i>Sup. utile – S_u (m²)</i>	<i>Rapporto di forma - S/V (m⁻¹)</i>	<i>Rapporto S_f/S_u (-)</i>
1.1	1600÷2700	400÷701	0,5676÷0,65	0,143÷0,164
1.2	2701÷3999	702÷1258	0.50918÷0,5675	0,143÷0,164
1.3	4000÷9100	1259÷2300	0.50917÷0,42	0,143÷0,164
2.1	1200÷2700	300÷701	0,5676÷0,76	0,165÷0,183
2.2	2701÷3999	702÷1258	0.50918÷0,5675	0,165÷0,183
2.3	4000÷9000	1259÷2300	0.50917÷0,38	0,165÷0,183

Tabella 4-10 – Tecnologie costruttive e impiantistiche degli edifici-tipo

	Edifici Tipo 1.1, 1.2, 1.3	Edifici Tipo 2.1, 2.2, 2.3
	<i>Tecnologie costruttive</i>	
Parteti esterne	Parete portante in muratura di mattoni pieni non isolata, (sp. 40 cm): $U=1.55$ W/(m ² K); Colorazione chiara: $\alpha=0,3$	Muratura a cassavuota in mattoni forati o semipieni non isolata, (sp. 30 cm): $U=1.25$ W/(m ² K); Colorazione chiara: $\alpha=0,3$
Parete verso locale non climatizzato	Muratura in mattoni pieni non isolata (sp. 25 cm); $U=1.80$ W/(m ² K)	Muratura in mattoni forati non isolata (sp. 12 cm); $U=1.60$ W/(m ² K)
Solai interpiano	Solaio misto con travetti prefabbricati in c.a. e pignatte in laterizio di alleggerimento, non isolato (sp. 25 ÷ 30 cm): Pavimento su spazio non climatizzato $U=1.40$ W/(m ² K) Pavimento su spazio esterno $U=1.70$ W/(m ² K) Soffitto su spazio non climatizzato $U=1.75$ W/(m ² K)	
Copertura	Copertura a falde inclinate realizzata con solaio latero-cementizio: $U=2.00$ W/(m ² K) Colorazione media: $\alpha=0,6$	
Pavimento verso il terreno	Soletta in calcestruzzo armato; $U=2.20$ W/(m ² K)	
Infissi	Vetro camera normale con intercapedine d'aria (3-6-3): $U_g= 3.3$ W/(m ² K) e fattore solare ($g_{gl,n}$) = 0.75; Telaio in legno; $U_f= 2.1$ W/(m ² K); $U_w=3.3$ W/(m ² K) Chiusure oscuranti con avvolgibili in legno o plastica Cassonetto non isolato ($U= 6$ W/(m ² K))	
	<i>Tecnologie impiantistiche - riscaldamento</i>	
Generazione	Generatore a gas individuale (potenza nominale $\phi_{Pn} = 24$ kW, potenza a carico intermedio $\phi_{Pint} = 8$ kW) tipo B o C con installazione esterna o interna (produzione combinata di acqua calda sanitaria). Rendimento di generazione η_{gn} considerato fra 0.84 e 0,92 a seconda della tipologia e posizione della caldaia (si considera un valore medio pari a 0,88) Potenza a pieno carico degli ausiliari del sistema di generazione: da 40W a 200W a seconda del tipo di caldaia (si considera il valore medio pari a 120W) (Corrado et al., 2014; Ente Nazionale Italiano di Unificazione - UNI, 2014b).	
Distribuzione	Distribuzione separata per appartamento (tubazioni con isolamento scadente o inesistente). Rendimento di distribuzione η_d compreso fra 0,93 e 0,99 a seconda della posizione dell'appartamento. (Corrado et al., 2014; Ente Nazionale Italiano di Unificazione - UNI, 2014b)	
Regolazione	Termostato di zona (appartamento) on-off; rendimento regolazione – $\eta_r = 0,93$. (Ente Nazionale Italiano di Unificazione - UNI, 2014b)	
Emissione	Radiatori ad acqua calda (70°C/60°C) installati su parete esterna non isolata; Rendimento emissione – $\eta_e = 0,92$. (Ente Nazionale Italiano di Unificazione - UNI, 2014b)	

	<i>Tecnologie impiantistiche – raffrescamento(di nuova installazione)</i>
Generazione	Sistemi individuali con pompa di calore a ciclo invertibile ad espansione diretta aria-aria (multi split) <u>impiegati per il solo raffrescamento</u> . Potenza nominale in raffrescamento: 6÷7 kW, indice di efficienza energetica EER: 3,0 (D.M.26/6/2015, 2015). Potenza ausiliari del sistema di generazione (ventilatore elicoidale dell'unità moto-condensante): 30W (Ente Nazionale Italiano di Unificazione - UNI, 2010)
Distribuzione	Le perdite di distribuzione del circuito frigorifero si considerano comprese nel rendimento di produzione dell'unità ad espansione diretta. (Ente Nazionale Italiano di Unificazione - UNI, 2010);
Regolazione	Controllo per singolo ambiente con regolazione modulante (banda 1 °C) di regolazione $\eta_r = 0,98$ (Ente Nazionale Italiano di Unificazione - UNI, 2010)
Emissione	Unità interna sistemi split. Rendimento di emissione $\eta_e = 0,97$; Potenza ausiliari al sistema di emissione (ventilatore unità interna): 50W
Ventilazione	Ventilazione naturale realizzata mediante l'apertura delle finestre. Nessun sistema di ventilazione meccanica controllata

Coerentemente con quanto previsto dalla metodologia comune di calcolo del progetto TABULA (TABULA Project Team, 2013), che costituisce il riferimento per l'elaborazione degli edifici-tipo, i ponti termici geometrici e materici, sono stati considerati forfettariamente mediante un incremento di $0,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ della trasmittanza termica media dei componenti dell'involucro opaco in ragione delle loro specifiche caratteristiche tecnologiche. Sia la muratura portante in mattoni pieni che la muratura a cassetta di tamponamento sono, infatti, interrotte da elementi in calcestruzzo armato, con conduttività termica più elevata, costituiti, nel primo caso, dai cordoli dei solai e, nel secondo caso, da travi e pilastri del telaio strutturale. I valori di trasmittanza delle strutture opache elencati nella Tabella 4-10 devono essere pertanto considerati comprensivi dell'effetto dei ponti termici.

Nel censimento delle caratteristiche impiantistiche degli edifici del campione di studio non è stato possibile rilevare dettagliatamente la presenza di sistemi per la climatizzazione estiva. Pertanto coerentemente con le analisi CRESME (Toso and Mura, 2014) riportate nel paragrafo 4.1 e con i rilievi sul caso di studio reale impiegato nelle simulazioni preliminari (paragrafo 3.2.1) è stato ipotizzato di attribuire agli edifici-tipo una dotazione standard per la climatizzazione estiva costituita da sistemi

split o *multi split* consistenti in pompe di calore a ciclo invertibile ad espansione diretta aria-aria. Tale ipotesi è elaborata anche in conseguenza dei risultati dalle analisi preliminari (paragrafo 3.2) che evidenziano come i fabbisogni netti di energia per la climatizzazione estiva degli edifici residenziali standard oggetto di simulazione, siano tali, da non poter essere soddisfatti totalmente senza l’ausilio di sistemi di raffrescamento meccanico. In considerazione di quanto detto, ai fini dell’analisi dei costi globali, i sistemi per la climatizzazione estiva si considerano installati per la prima volta all’inizio del periodo di calcolo pertanto è stata loro attribuita un indice di efficienza energetica (EER) pari a 3,0 come previsto dal DM 26/6/2015 allegato B per l’installazione di un nuovo generatore per la climatizzazione estiva.

A corredo dell’analisi svolta, nella

Tabella 4-11 è riportato un confronto fra alcuni parametri geometrici degli edifici-tipo 1.2, 2.2, 1.3 e 2.3 e i corrispondenti valori degli edifici-tipo della Matrice Tipologica di TABULA (“edificio multifamiliare” e “blocco di appartamenti” nei periodi 1946-1960 e 1961-1975). Gli scostamenti relativi al parametro S/V sono inferiori al 10%, nonostante che gli altri parametri presentino in alcuni casi notevoli differenze.

Tabella 4-11 – Confronto fra i valori assunti dai principali parametri geometrici degli edifici – tipo di TABULA e quelli di studio

Parametro	TABULA blocco app. 1946-1960	Ed. Tipo 1.3	TABULA blocco app. 1961-1975	Ed. Tipo 2.3	TABULA edificio multifam. 1946-1960	Ed. Tipo 1.2	TABULA edificio multifam. 1961-1975	Ed. Tipo 2.2
V [m ³]	5949	6294	9438	6202	3076	2617	3074	3697
S/V [m ⁻¹]	0.46	0.47	0.46	0.50	0.51	0.54	0.54	0.58
num. U. I.	24	24	40	16	12	12	10	12
n. piani	4	4	8	4	3	3	5	3
V/num U.I.[m ³]	248	262	236	387	256	218	307	308

Nella Figura 4-75 sono riportate le immagini dei modelli degli edifici tipo per la simulazione energetica con Design Builder. Nella **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** e seguenti sono riportate le planimetrie schematiche degli edifici-tipo elaborati secondo la metodologia presentata.

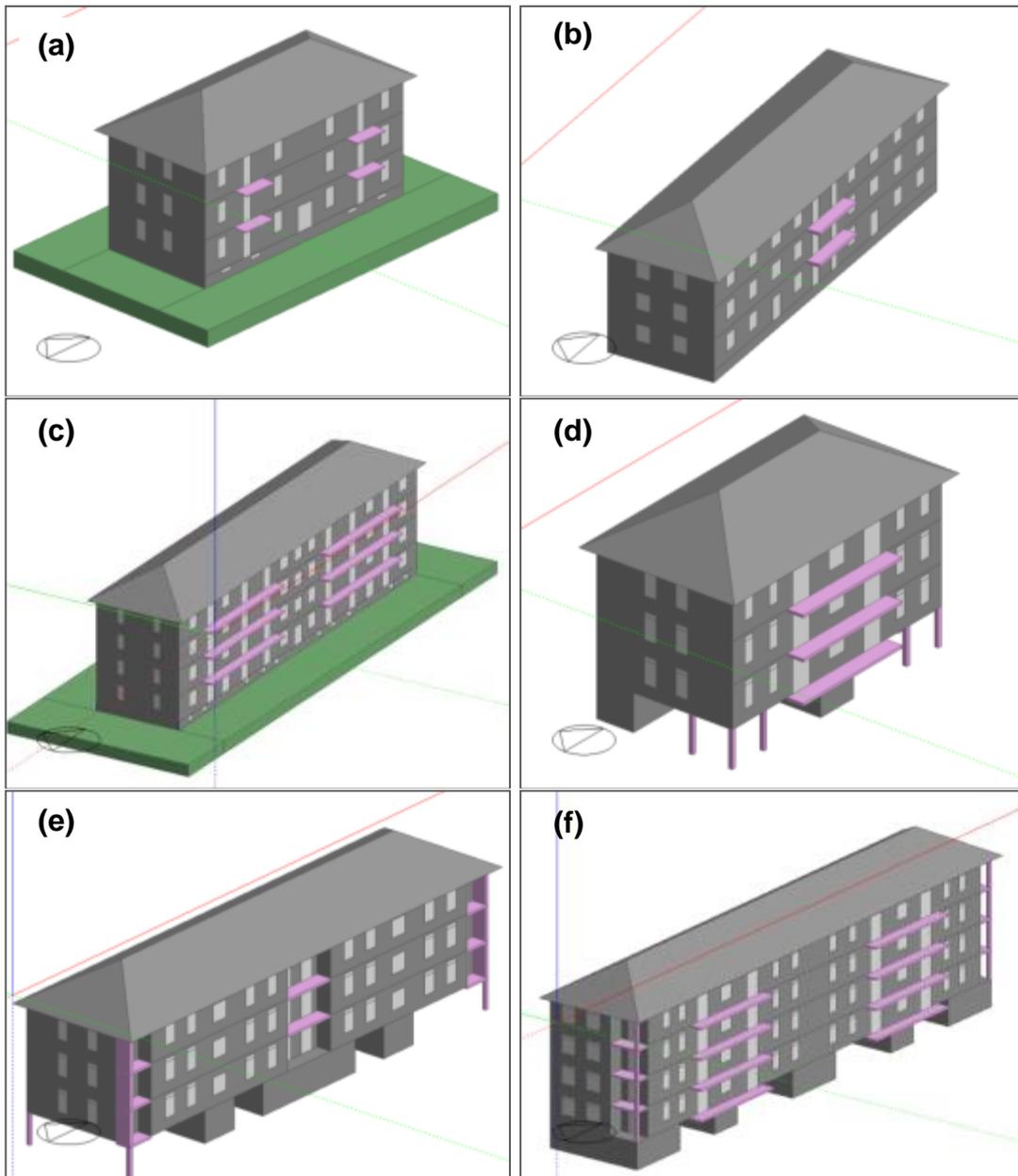


Figura 4-75 – Modelli degli edifici tipo per la simulazione energetica con Design Builder. Edificio 1.1 (a), 1.2 (b), 1.3 (c), 2.1 (d), 2.2 (e), 2.3 (f)

5 Interventi di riqualificazione energetica

5.1 Selezione delle misure di efficienza energetica

Affinché i risultati della presente ricerca possano tradursi in indicazioni applicabili efficacemente al patrimonio edilizio residenziale, sono state privilegiate le misure di efficienza energetica ⁴⁷ che hanno la maggior probabilità di essere concretamente realizzate, in quanto caratterizzate da una applicabilità ampiamente sperimentata, da un uso largamente diffuso e da una fattibilità tecnica ed economica comprovata. Sono stati pertanto esclusi gli interventi di efficientamento energetico con scarsa diffusione dovuta alla presenza di:

- barriere economiche: costi troppo elevati o incertezza/mancanza di incentivi economici;
- barriere tecnologiche: affidabilità ed efficacia non ancora comprovata o installazione che comporta eccessive problematiche tecniche (Morck et al., 2016).

In particolare le misure di efficienza energetica da applicare agli edifici-tipo sono state selezionate sulla base dell'analisi della documentazione ENEA (Nocera, 2015) relativa alla diffusione sul territorio nazionale degli interventi di riqualificazione energetica incentivati e agevolati dal Governo italiano a partire dal 2007. Nella Figura 5-1 e nella Figura 5-2 è mostrata la diffusione di detti interventi nel 2013 per numero di interventi, nella prima, e per importo investito nella seconda. Nella Figura 5-3 e nella Figura 5-4 lo stesso tipo di analisi è esteso all'intero periodo di applicazione (dal 2007) del cosiddetto "Ecobonus". Infine nella Figura 5-5 è riportata la distribuzione degli interventi per tipologia edilizia, da cui si evince una diffusa applicazione anche ad edifici multifamiliari con 3 o più piani, assimilabili, quindi, al parco edilizio oggetto della presente indagine.

Per quanto riguarda gli interventi sull'involucro esterno si riportano di seguito anche i dati assoluti delle superfici riqualificate per l'anno 2013:

- 531000 m² di strutture opache verticali coibentate;
- 826000 m² di strutture opache orizzontali coibentate;

⁴⁷ *misura di efficienza energetica*, una modifica apportata a un edificio che risulti nella riduzione del fabbisogno di energia primaria dell'edificio stesso (*Direttiva 2010/31/UE*, 2010)

- 3100000 m² di infissi sostituiti.

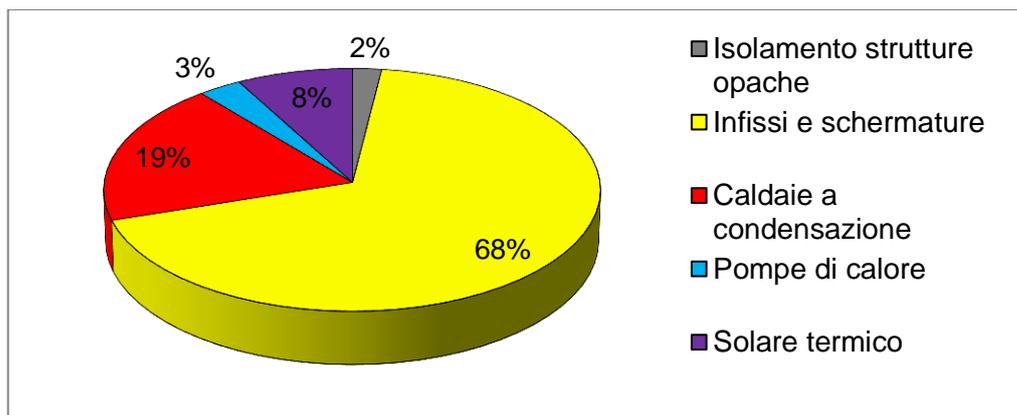


Figura 5-1 - Distribuzione del numero delle richieste di detrazione fiscale nel 2013 per tipologia di intervento (Nocera, 2015)

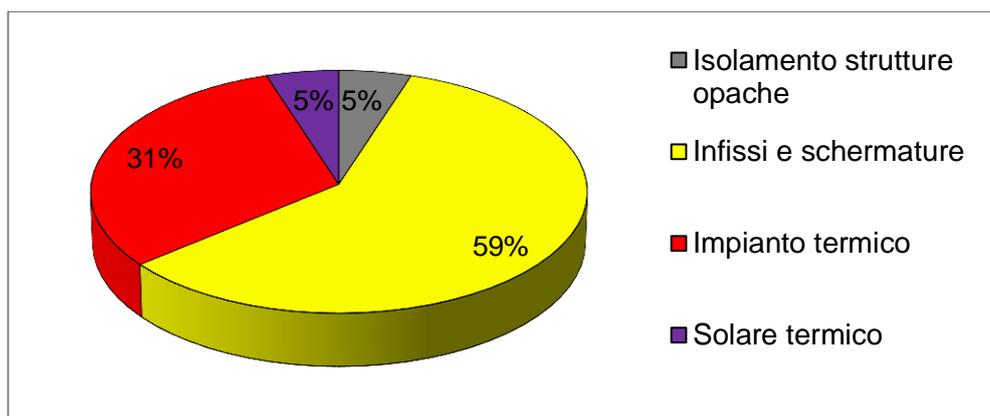


Figura 5-2 - Distribuzione per tipologia di intervento degli investimenti effettuati dai beneficiari nell'anno fiscale 2013 (Nocera, 2015)

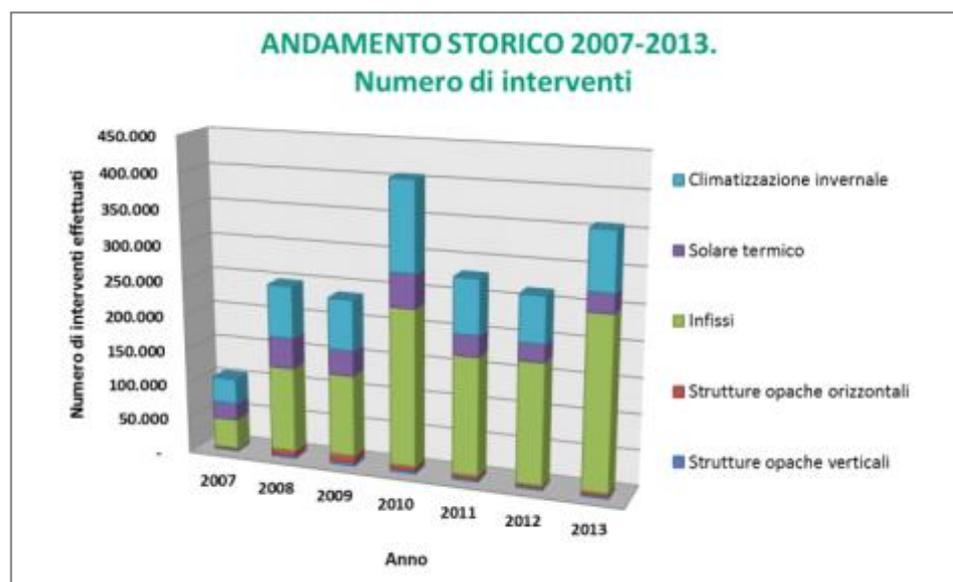


Figura 5-3 - Distribuzione storica del numero delle richieste di detrazione fiscale per tipologia di intervento (Nocera, 2015)

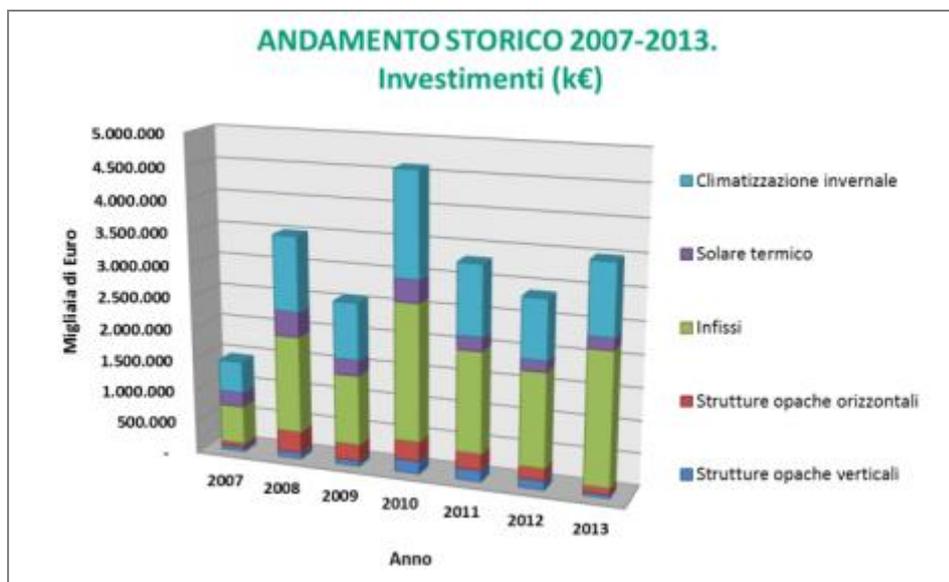


Figura 5-4 - Distribuzione storica per tipologia di intervento degli investimenti effettuati dai beneficiari (Nocera, 2015)



Figura 5-5 – Distribuzione degli interventi per tipologia edilizia (Nocera, 2015)

Coerentemente con l'analisi citata sono state selezionate le seguenti tipologie di di riqualificazione con indicate le corrispondenti sigle identificative:

- Isolamento dell'involucro opaco esterno (sigla IE);
- Sostituzione degli infissi (sigla SI);
- Installazione di schermature solari esterne (sigla SI_S);

Efficientamento dell'impianto di climatizzazione invernale ed estiva (individuali) mediante il ricorso a generatori a condensazione e a pompe di calore elettriche (sigla IC). Tali interventi si differenziano primariamente per il livello di applicabilità: mentre la prima misura è applicabile esclusivamente a livello condominiale su iniziativa del

proprietario dell'immobile (se unico come nel caso degli alloggi ERP) o dell'assemblea condominiale, le altre misure possono essere applicate sia a livello condominiale che a livello individuale.

Per quanto riguarda il primo punto, in ragione delle caratteristiche tipologiche e tecnologiche degli edifici-tipo oggetto di analisi, si prevede l'isolamento termico delle pareti verticali, l'isolamento termico dell'ultimo solaio verso il sottotetto non abitabile applicato sull'estradosso, e l'isolamento termico del pavimento su spazio aperto (pilotis) o su spazio non riscaldato (autorimesse, cantine, vani tecnici) ove presente (tutti gli edifici-tipo ad eccezione del 1.2). Non è stato previsto l'isolamento del solaio su terreno o su vespaio aerato (edificio-tipo 1.2) per evidenti problemi di fattibilità tecnica dell'intervento.

Per quanto riguarda l'ultimo intervento, si prevede sia la sostruzione del solo generatore di calore (caldaia tradizionale tipo B o C) con una caldaia ad alto rendimento a condensazione, sia la sostituzione dell'impianto di riscaldamento esistente con un sistema di pompe di calore aria-aria ad espansione diretta a ciclo invertibile, in grado di fornire sia riscaldamento che raffrescamento; la pompa di calore sostituisce pertanto, anche l'impianto di raffrescamento esistente, che si è ipotizzato essere presente negli edifici-tipo in affiancamento a quello di riscaldamento (vedi paragrafo 4.4.4). Questa prassi del doppio impianto è stata per anni sponsorizzata dai costruttori che, al fine di contenere i costi di vendita degli alloggi, fornivano l'installazione di impianti di riscaldamento tradizionali con terminali a radiatori o al più a pannelli radianti, mentre predisponavano gli allacciamenti per l'installazione degli impianti split aria-aria per il solo raffrescamento, lasciando all'utente ogni decisione in merito alla potenza, alla posizione e alla tipologia.

La prassi suddetta è confermata dalla diffusione degli impianti a pompa di calore con ciclo invertibile evidenziata dal CRESME: nel 2014 le abitazioni dotate di pompe di calore aria-aria invertibili, usate in inverno come supporto/sostituzione alla caldaia (individuale o centralizzata) e in estate come climatizzatore, hanno raggiunto quota 7,7 milioni su circa 30 milioni di abitazioni considerate (Toso and Mura, 2014). Lo stesso studio sottolinea come siano in crescita le abitazioni che impiegano esclusivamente questo tipo di impianto riducendo o annullando (nel caso di fornello elettrico e boiler elettrico o altro sistema per l'ACS) l'uso del gas come vettore energetico per i servizi domestici. Questa tendenza è poi definitivamente confermata dal fatto che dal 2010 la

totalità dei climatizzatori presenti sul mercato siano pompe di calore aria-aria a ciclo invertibile. A conclusione della ricerca, CRESME ha valutato, che, rispetto al 2014, nel 2020, le abitazioni servite da impianti a gas (per uso esclusivo di riscaldamento) aumenteranno del 6%, mentre le abitazioni servite esclusivamente o complementariamente dagli impianti con climatizzatore elettrico (raffrescamento e riscaldamento completo o parziale) aumenteranno del 33%.

La selezione delle misure di efficienza energetica è inoltre coerente con i risultati preliminari del Progetto IEA-EBC (*International Energy Agency - Energy in Buildings and Communities*) Annex 56 “*Cost Effective Energy & CO2 Emissions Optimization in Building Renovation*” in cui sono stati censiti e descritti 18 esempi di buone pratiche (*Shining Examples*) per la riqualificazione energetica completa (più misure di efficienza energetica coordinate fra loro) degli edifici residenziali esistenti (Figura 5-6). Nella Figura 5-7 è riportata la frequenza con cui si presentano le singole misure di efficienza energetica. Nei casi studio presentati l’isolamento termico dell’involucro opaco, presente in tutti gli interventi, comprende sia l’isolamento delle pareti verticali che della chiusura orizzontale superiore. In due casi l’isolamento delle pareti verticali si effettua con una nuova facciata tecnologicamente avanzata, addossata alla facciata esistente, che integra gli impianti e le superfici captanti per la produzione di energia da fonti rinnovabili. Questa soluzione è stata messa a punto nell’ambito del progetto Olandese Energy transition program - Energiesprong nel 2014 (EnergieSprong Platform 31, 2014) che si sta diffondendo in tutta Europa e recentemente anche in Italia.

Per quanto riguarda la sostituzione degli infissi, prevalentemente si prevede telai in legno o in alluminio a taglio termico con vetri doppi nei paesi del Sud Europa e con vetri tripli nei paesi del Nord Europa. La ventilazione meccanica controllata con recupero di calore dall’aria espulsa è presente 14 volte su 18, ma non è stata applicata nei casi studio collocati nelle località più calde situate in Spagna e Portogallo a causa della scarsa efficacia del sistema. I 13 casi di sostituzione del generatore sono ulteriormente articolati in 3 pompe di calore geotermiche a bassa entalpia acqua-suolo (1 invertibile), 1 pompa di calore a espansione diretta aria-aria (invertibile), 4 micro-generatori a gas, 4 impianti di riscaldamento coadiuvati dal solare termico, 2 allacciamenti alla rete di teleriscaldamento e 2 sistemi con generatore a biomassa. Nei 3 casi studio posti in Portogallo, a causa del clima temperato e della riduzione dell’inerzia

termica e delle dispersioni notturne per gli interventi di isolamento dell'involucro opaco, si è resa necessaria l'installazione di un sistema di climatizzazione estiva.



Figura 5-6 Esempi di interventi di riqualificazione energetica degli edifici residenziali multifamiliari esistenti presenti negli *shining examples* dell'IEA EBC Annex 56 (Morck et al., 2016)

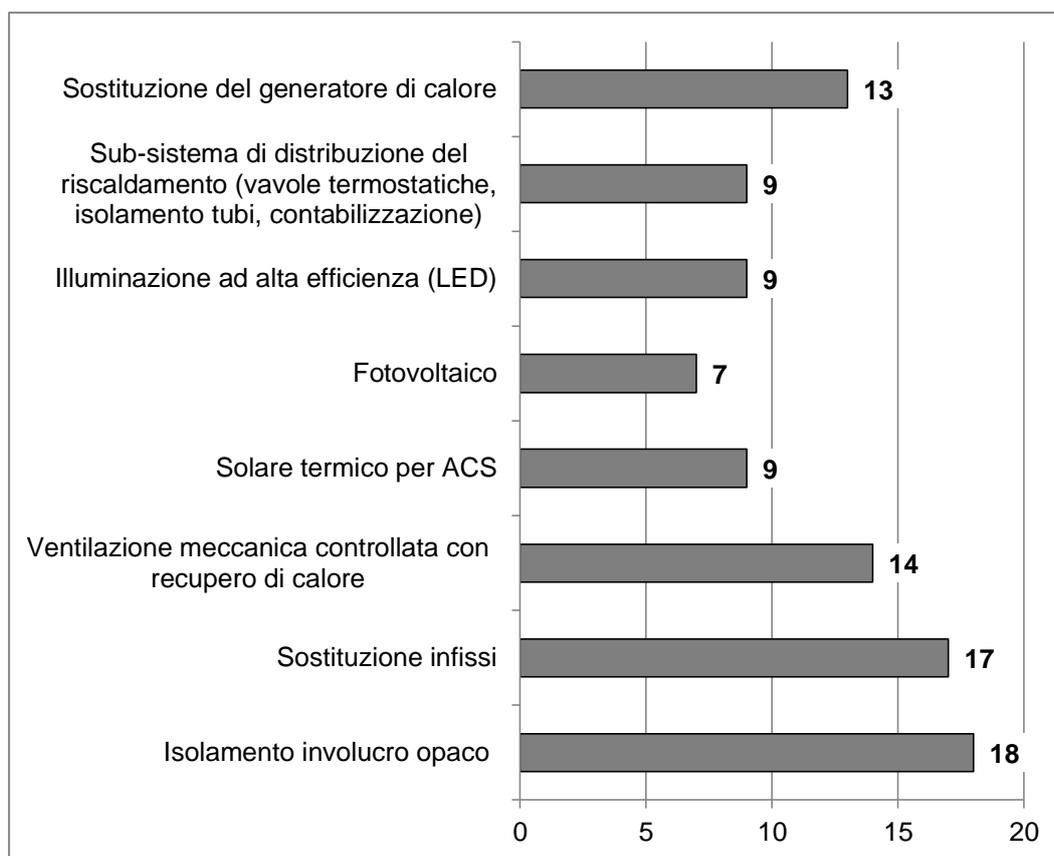


Figura 5-7 – Tipi di misure di efficienza energetica presenti negli *shining examples* dell'IEA EBC Annex 56 (Morck et al., 2016)

Alle misure elencate nel suddetto progetto si sono aggiunte le schermature per questi motivi:

- Sono un intervento fiscalmente incentivato;
- I risultati delle simulazioni preliminari presentati al paragrafo 3.2.2 e i risultati di molti altri studi sull'argomento (Evola et al., 2014a; Florides et al., 2002; Jaber and Ajib, 2011; Kim et al., 2012; Nikoofard et al., 2014; Palmero-Marrero and Oliveira, 2010; Stevanović, 2013; Tsikaloudaki et al., 2012) ne dimostrano l'efficacia per la riduzione dei consumi energetici estivi degli edifici residenziali nuovi o sottoposti a riqualificazione energetica;
- Sono oggetto di analisi numeriche e sperimentali svolte dal Laboratorio di Fisica Ambientale per la Qualità Edilizia (LFAQE) dell'Università di Firenze insieme al Centro Interuniversitario di Ricerca sull'Inquinamento da Agenti Fisici (CIRIAF) dell'Università di Perugia, mirate a verificarne l'efficacia mediante applicazione a scala reale su Test Room rappresentative della tecnologia edilizia residenziale (Figura

5-8)⁴⁸.



Figura 5-8 – Test Room impiegate per la campagna di sperimentazione in opera di schermature residenziali con controllo automatico

I due principali sistemi per lo sfruttamento dell'energia solare nell'edilizia residenziale (il solare termico e il fotovoltaico) non sono stati presi in considerazione fra le misure di efficienza energetica oltre che per le problematiche installative e gestionali anche per i seguenti motivi:

- Il solare termico, è difficilmente applicabile a condomini esistenti in cui la produzione di acqua calda sanitaria viene fatta prevalentemente a livello individuale mediante caldaie a gas combinate o bollitori elettrici;
- Il fotovoltaico, è scarsamente impiegato come intervento di efficientamento in condomini residenziali esistenti, dove i consumi elettrici condominiali (in assenza di impianti elevatori come ne casi-studio esaminati) sono di solito marginali a fronte dei consumi individuali.

⁴⁸ I risultati di queste ricerche sono stati pubblicati su riviste scientifiche internazionali in forma di articoli dei quali il Dottorando è co-autore (Carletti et al., 2014; Sciorpi et al., 2015; Carletti et al., 2016; Secchi et al., 2016).

- Le casistiche di intervento previste, anche quando valutate in combinazione fra loro (vedi paragrafo 5.2), non sono necessariamente fra quelle gravate da obblighi di integrazione delle energie rinnovabili ex D.Lgs 28/2011;
- Le superfici condominiali a disposizione per le installazioni, sia in termini dimensionali che di orientamento ottimale, difficilmente possono accogliere impianti di potenza adeguata.

Infine si ricorda che le misure selezionate, pur non esaurendo il panorama di interventi di efficientamento degli edifici esistenti in area mediterranea, rispondono al criterio di accesso alle incentivazioni fiscali, fattibilità tecnica e convenienza economica comprovata e documentata, (Costanzo et al., 2016, 2013, Evola et al., 2015, 2014b).

5.2 Caratteristiche degli interventi

Ciascuno degli interventi elencati nel precedente paragrafo è stato caratterizzato da 3 livelli prestazionali crescenti:

- Livello 0, corrispondente alla prestazione dell'elemento tecnico non efficientato;
- Livello 1, corrispondente ad un **livello prestazionale standard**, identificabile con i valori “2015” stabiliti dal D.M. 26/6/2015 per la riqualificazione degli elementi tecnici degli edifici esistenti (Allegato B) in funzione della zona climatica (C o D);
- Livello 2, corrispondente ad un **livello prestazionale avanzato** (oltre il limite nZEB per le zone C e D), identificabile con i valore “2019/2021” più restrittivi presenti nel DM 26/6/2016 per l'involucro opaco(valori per zona F).

Nelle Tabelle 5-1, 5-2 e 5-3 sono riportate caratteristiche prestazionali, costo di investimento al momento iniziale (C_I), costo di sostituzione (C_R), costo di manutenzione (C_M) e vita utile degli interventi analizzati. Al fine di garantire una maggiore possibilità di confronto fra i risultati e in considerazione del fatto che i parametri economici sono espressi in termini reali (al netto dell'inflazione), i costi di investimento e di sostituzione sono posti uguali a quelli inerenti i requisiti minimi di prestazione energetica in funzione del costo globale (Ministero dello Sviluppo Economico, 2013) che a sua volta li riprende dai preziosi DEI (Prezzi Informativi dell'Edilizia per Recupero, Ristrutturazione e Manutenzione) o da apposite indagini di mercato. Ciò equivale a considerare il costo degli interventi al 2013 pari a quello del 2015 salvo

l'aumento dovuto all'inflazione. Ciò è coerente con l'ipotesi di non considerare apprezzamenti o deprezzamenti delle misure di efficienza dovuti a fenomeni di mercato o di progresso tecnologico e produttivo. Nei casi in cui gli interventi considerati non trovassero un corrispondente prezzo di riferimento nel suddetto documento si è fatto ricorso a prezzi ufficiali validi per il territorio Toscano (Camera di Commercio di Firenze, 2015; Collegio Ingegneri della Toscana, 2015). I dati relativi ai costi di manutenzione e alla vita utile delle singole misure di efficienza energetica fanno riferimento alle norme tecniche e alla manualistica di settore (Ente Nazionale Italiano di Unificazione - UNI, 2008c; Di Giulio and Croce, 2003; Busato, 2014).

Come detto il calcolo adotta una prospettiva di tipo finanziario, pertanto i prezzi sono IVA (10%) compresa.

A scopo cautelativo, non avendo caratterizzato esattamente la configurazione degli spazi non riscaldati adiacenti al volume lordo riscaldato degli edifici-tipo (superfici disperdenti e aperture per la ventilazione), il fattore di correzione dello scambio termico ($b_{tr,U}$) è stato posto pari a 1 e quindi i valori limite di trasmittanza verso tali ambienti risultano uguali a quelli delle superfici disperdenti verso l'esterno.

Tabella 5-1 – Misure di efficienza energetica sull'involucro opaco

Sigla	Livelli prestazionali
IE0	Nessun intervento
IE1	Pareti verticali isolamento esterno con pannelli in EPS (conducibilità termica $\lambda=0,034$ W/(mK)) <u>Edifici tipo 1.1, 1.2 e 1.3</u> Zona C: $U=0.40$ W/(m ² K); spessore 0,08 m; $C_I=C_R: 77.9$ €/m ² Zona D: $U=0.36$ W/(m ² K); spessore 0,09 m; $C_I=C_R: 80.4$ €/m ² <u>Edifici tipo 2.1, 2.2 e 2.3</u> Zona C: $U=0.40$ W/(m ² K); spessore 0,07 m; $C_I=C_R: 75.5$ €/m ² Zona D: $U=0.36$ W/(m ² K); spessore 0,08 m; $C_I=C_R: 77.9$ €/m ²
	Chiusura superiore su spazio non climatizzato (tutti gli edifici tipo) isolamento sul lato superiore con pannelli semirigidi in fibra di vetro ($\lambda=0,043$ W/(mK)) Zona C: $U=0.34$ W/(m ² K); spessore 0,12 m; $C_I=C_R: 12.2$ €/m ² Zona D: $U=0.28$ W/(m ² K); spessore 0,16 m; $C_I=C_R: 15.1$ €/m ²
	Chiusura inferiore su spazio esterno o non climatizzato (tutti gli edifici tipo) isolamento sul lato inferiore con pannelli in EPS ($\lambda=0,034$ W/(mK)) Zona C: $U=0.42$ W/(m ² K); spessore 0,07 m; $C_I=C_R: 65.0$ €/m ² Zona D: $U=0.36$ W/(m ² K); spessore 0,09 m; $C_I=C_R: 69.2$ €/m ²
IE2	Pareti verticali isolamento esterno con pannelli in EPS (conducibilità termica $\lambda=0,034$ W/(mK)) <u>Edifici tipo 1.1, 1.2 e 1.3</u> Zona C, D: $U=0.24$ W/(m ² K); spessore 0,12 m; $C_I=C_R: 87.7$ €/m ² <u>Edifici tipo 2.1, 2.2 e 2.3</u> Zona C, D: $U=0.24$ W/(m ² K); spessore 0,11 m; $C_I=C_R: 85.2$ €/m ²
	Chiusura superiore su spazio non climatizzato (tutti gli edifici tipo) isolamento sul lato superiore con pannelli semirigidi in fibra di vetro ($\lambda=0,043$ W/(mK)) Zona C, D: $U=0.20$ W/(m ² K); spessore 0,19 m; $C_I=C_R: 17.2$ €/m ²
	Chiusura inferiore su spazio esterno o non climatizzato (tutti gli edifici tipo) isolamento sul lato inferiore con pannelli in EPS ($\lambda=0,035$ W/(mK)) Zona C, D: $U=0.24$ W/(m ² K); spessore 0,12 m; $C_I=C_R: 75.6$ €/m ²
Vita utile isolamento pareti verticali e chiusura inferiore: 30 anni Vita utile isolamento chiusura superiore : 40 anni	

Lo spessore dello strato isolante da aggiungere alla muratura preesistente è stato calcolato, per raggiungere la trasmittanza obiettivo considerando la presenza dei ponti termici presenti nella parete⁴⁹. Occorre poi considerare che la tecnologia di isolamento

⁴⁹ “I valori di trasmittanza limite si considerano comprensivi dei ponti termici all’interno delle strutture oggetto di riqualificazione (a esempio ponte termico tra finestra e

termico a cappotto permette di ridurre le dispersioni termiche per trasmissione attraverso l'involucro opaco attribuibili ai ponti termici. Pertanto il contributo dei ponti termici è stato valutato in maniera forfettaria adottando, coerentemente con la metodologia TABULA (TABULA Project Team, 2013), una maggiorazione di 0,05 W/m²K corrispondente alla categoria degli edifici esistenti oggetto di interventi di isolamento a cappotto.

Tabella 5-2 - Misure di efficienza energetica sui serramenti

SI0	Nessun intervento ad eccezione della sostituzione a fine vita utile dell'infilso esistente con uno delle caratteristiche analoghe; C_R: 325 €/m²	
SI1	Zona D Vetro doppio chiaro basso emissivo con aria 4-16-4 e telaio in legno + cassetto coibentato (U=1.0 W/(m ² K)) U _g = 1.60 W/(m ² K); g _{gl,n} = 0.60; τ _v = 0.77; U _f = 2.10 W/(m ² K); U _w =2.10 W/(m ² K); C_I=C_R: 520 €/m²	Zona C Vetro doppio chiaro basso emissivo con aria 4-12-4 e telaio in legno + cassetto coibentato (U=1.0 W/(m ² K)) U _g = 2.00 W/(m ² K); g _{gl,n} = 0.60; τ _v = 0.77; U _f = 2.10 W/(m ² K); U _w =2.35 W/(m ² K); C_I=C_R: 440 €/m²
SI2	Vetro triplo chiaro basso emissivo con aria 4-12-4-12-4 con telaio in PVC + cassetto coibentato (U=1.0 W/(m ² K)) U _g = 0.8 W/(m ² K); g _{gl,n} = 0.45; τ _v = 0.66; U _f = 1.2 W/(m ² K); U _w =1.1 W/(m ² K); C_I=C_R: 625 €/m²	
SI0-S SI1-S SI2-S	Configurazioni precedenti con aggiunta di schermatura esterna manuale a veneziana con lamelle bianche mobili inclinate di 30° considerata chiusa nei mesi estivi (1Mag-30Set) nelle ore in cui l'irradianza sulla superficie della finestra supera i 300 W/m ² (Ente Nazionale Italiano di Unificazione - UNI, 2014a) τ _e = 0.3; a = 0.1; g _{gl+sh} /g _{gl} = 0.35; CI=CR: 105 €/m²	
Vita utile infissi: 30 anni		
Vita utile schermatura: 20 anni (WAREMA, 2016; Mark, 2012; Soltec Sun Shading Systems, 2016)		

Le proprietà ottiche della schermatura a veneziana (Ente Nazionale Italiano di Unificazione - UNI, 2014a), valutate in combinazione con le caratteristiche dei vetri, consentono di rispettare il valore limite del fattore di trasmissione solare totale $g_{gl+sh} \leq 0,35$ per componenti finestrati pari a (vedi paragrafo 1.2.2). Il programma di azionamento della veneziana è riportato in Tabella 5-2 conformemente alle valutazioni standardizzate (*asset rating*). Tale programma simula il comportamento di un utente standard ma può essere anche interpretato come frutto dell'azionamento di un dispositivo automatizzato.

muro) e di metà del ponte termico al perimetro della superficie oggetto di riqualificazione” (D.M.26/6/2015, 2015)

Tabella 5-3 - Misure di efficienza energetica sugli impianti di climatizzazione

<p>IC0</p>	<p>Riscaldamento</p> <p>La caldaia tradizionale tipo B o C esistente viene sostituita con una analoga, per esaurimento della vita utile, all'inizio del periodo di calcolo considerando i seguenti parametri economici e tecnici.</p> <p>C_R: 2000 €/UI; C_M: 30 €/UI*anno (1,5% di C_R) ; vita utile: 20 anni</p> <p>Raffrescamento</p> <p>Il sistema multi-split a pompa di calore invertibile (6÷7 kW, EER =3,0) si considera installato ex novo all'inizio del periodo di calcolo (vedi paragrafo 4.4.4) considerando i seguenti parametri economici e tecnici.</p> <p>C_I=C_R: 5500 €/UI; C_M: 110 €/UI*anno (2,0% di C_I); vita utile: 20 anni</p>
<p>IC1</p>	<p>Riscaldamento</p> <p>Generazione: generatore individuale a gas a condensazione con produzione combinata di ACS; potenza nominale $\phi_{PN} = 24 \text{ kW}$, potenza a carico intermedio $\phi_{Pint} = 8 \text{ kW}$; rendimento di generazione su PCI - $\eta_{gn} = 0,99$) (Ente Nazionale Italiano di Unificazione - UNI, 2014b). Potenza a pieno carico degli ausiliari del sistema di generazione: 200 W Emissione: radiatori (originali) alimentati a bassa temperatura 65°C/45°C installati su pareti esterne (rendimento emissione - η_e da 0,98 a 0,93 in funzione del livello di isolamento delle pareti)</p> <p>Regolazione: aggiunta di valvole termostatiche per regolazione del singolo ambiente (rendimento di regolazione $\eta_r=0.98$)</p> <p>Distribuzione: nessun intervento (rendimento di distribuzione η_d compreso fra 0,94 e 0,99 a seconda della posizione dell'appartamento)</p> <p>C_I=C_R: 2600 €/UI; C_M: 39 €/UI*anno (1,5% di C_R) ; vita utile: 20 anni</p> <p>Raffrescamento:</p> <p>Il sistema multi-split a pompa di calore invertibile (6÷7 kW, EER =3,0) si considera installato ex novo all'inizio del periodo di calcolo (vedi paragrafo 4.4.4) considerando i seguenti parametri economici e tecnici.</p> <p>C_I=C_R: 5500 €/UI; C_M: 110 €/UI*anno (2,0% di C_I); vita utile: 20 anni</p>
<p>IC2</p>	<p>Riscaldamento/Raffrescamento:</p> <p><u>Dismissione del sistema idronico di riscaldamento</u> e impiego della pompa di calore a ciclo invertibile ad espansione diretta aria-aria (multi split), precedentemente (IC0 e IC1) utilizzata per la sola climatizzazione estiva, per entrambe i servizi. Potenza nominale in raffrescamento: 6÷7 kW, potenza nominale in riscaldamento 8÷10 kW; Coefficiente di prestazione COP: 3,5; indice di efficienza energetica EER: 3,0 .(D.M.26/6/2015, 2015);</p> <p>C_I=C_R = 5800 €/UI⁵⁰; C_M: 232 €/UI*anno (4,0% di C_I); vita utile: 15 anni</p>

⁵⁰ Costo comprensivo dello smontaggio e accantonamento in discarica dei radiatori e dell'accecamento e rimozione dei tubi di adduzione.

Il sistema di climatizzazione invernale ed estiva con pompa di calore aria-aria a ciclo invertibile si considera installato all'inizio del periodo di calcolo (2015), pertanto è stato attribuito un indice di efficienza energetica (EER) pari a 3,0 e un coefficiente di prestazione (COP) pari a 3,5 (vedi DM 26/6/2015 allegato B per l'installazione di un nuovo generatore per la climatizzazione estiva).

Le misure di efficienza energetica selezionate se combinate in diversi tipi di intervento possono sviluppare interazioni reciproche. Ad esempio, il livello d'isolamento dell'involucro incide sulla potenza nominale dei sistemi di climatizzazione. In considerazione di ciò gli interventi di riqualificazione energetica proposti sono stati applicati sia singolarmente che in forma coordinata (Commissione Europea, 2012; *Regolamento UE 244/2012*, 2012). Le diverse combinazioni fra le singole misure di efficienza energetica danno luogo a 54 tipi di interventi di riqualificazione, differenziati fra loro per tipo di misure applicate e livelli prestazionali che le caratterizzano.

6 Risultati oggetto di parametrizzazione

Al fine di individuare le relazioni tra i parametri di input e l'efficacia degli interventi di riqualificazione, alla luce del rapporto prestazione energetica/costo globale, è necessario procedere alla parametrizzazione dei risultati delle simulazioni energetiche e delle elaborazioni economiche effettuate sulla matrice tipologica.

In particolare, a titolo esemplificativo, si presentano i risultati per gli **edifici tipo 1.3 e 2.1** della Matrice Tipologica (paragrafo 4.4.4). Gli edifici 1.3 e 2.1 rappresentano le due casistiche “estreme” (ovvero potenzialmente più critiche a fronte del previsto incremento delle temperature) fra le quali si collocano gli altri casi di studio, per i seguenti motivi:

- Appartengono alle classi dimensionali di confine, la più grande, l'edificio 1.3, e la più piccola, il 2.1;
- Presentano il minimo e il massimo rapporto fra superficie disperdente e volume lordo riscaldato ($S/V=0.47$ per l'edificio-tipo 1.3; $S/V=0.61$ per l'edificio-tipo 2.1);
- Appartengono ad epoche di costruzione diverse, 1946-1960 l'edificio 1.3, 1961-1977 l'edificio 2.1;
- Sono rappresentativi dell'intera Matrice Tipologica per quanto riguarda il rapporto fra superficie finestrata e superficie utile compresa nel campo di valori $0,16 < (S_f/S_u) < 0,18$;
- Rappresentano bene il campo di variazione entro cui è possibile comprendere sia gli edifici tipologicamente più diffusi (edificio 2.1 col 20% del campione) sia quelli meno diffusi (edificio 1.3 col 9% del campione).

I risultati ottenuti per questi edifici tipo sono pertanto particolarmente significativi e per questo utilizzati nell'esemplificazione del foglio di calcolo (data base dei risultati), che sarà oggetto di periodico aggiornamento, e che costituisce lo strumento operativo della metodologia (vedi paragrafo 6.3).

Ciò premesso, al variare dell'edificio considerato (edificio-tipo 1.3 e 2.1), della zona climatica (zona “C” o “D”) e dell'orientamento (asse S/N o E/O), i risultati sono analizzati in funzione dei parametri climatici ed economici di seguito richiamati:

- Entità del cambiamento climatico (nessun cambiamento climatico o scenario di concentrazione gas serra pessimistico – RCP8.5);

- Vita utile dell'edificio: 50 e 80 anni;
- Tasso di sconto: 3 e 5%;
- Andamento dei prezzi dei combustibili (incremento moderato e incremento elevato).

La combinazione dei valori assunti dai suddetti parametri dà luogo a 16 possibili scenari climatici ed economici per ciascun tipo di edificio, zona climatica e orientamento, per un totale di 128 casi analizzati.

Questo approccio permette di valutare la sensibilità delle strategie di riqualificazione proposte al variare dei suddetti parametri, alcuni dei quali, in considerazione dell'orizzonte temporale estremamente esteso, costituiscono i principali fattori di incertezza considerati per la metodologia di studio.

E' questo uno degli aspetti più critici, unitamente all'incertezza insita nell'attività dell'utenza, che ci troviamo ad affrontare e che solo un'analisi metodologica del tipo esemplificato può ricondurre in termini di valutazione del *rischio di risultato* insito nella scelta di un intervento piuttosto che di un altro.

Per quanto riguarda gli effetti dell'orientamento dell'edificio, sono stati selezionati i casi con esposizione del fronte principale verso Ovest e Sud. Come si può vedere dalla Figura 6-1 e dalla Figura 6-2 questi corrispondono rispettivamente ai valori massimo e minimo dell'indice di prestazione energetica per la climatizzazione estiva ed invernale ($EP_H + EP_C$), valutato sui tre orizzonti temporali considerati (2016-2035, 2036-2065 e 2066-2095). I due orientamenti selezionati rappresentano, nella esemplificazione metodologica, le casistiche "estreme" rispetto alle quali valutare la *robustezza* degli interventi di riqualificazione energetica proposti.

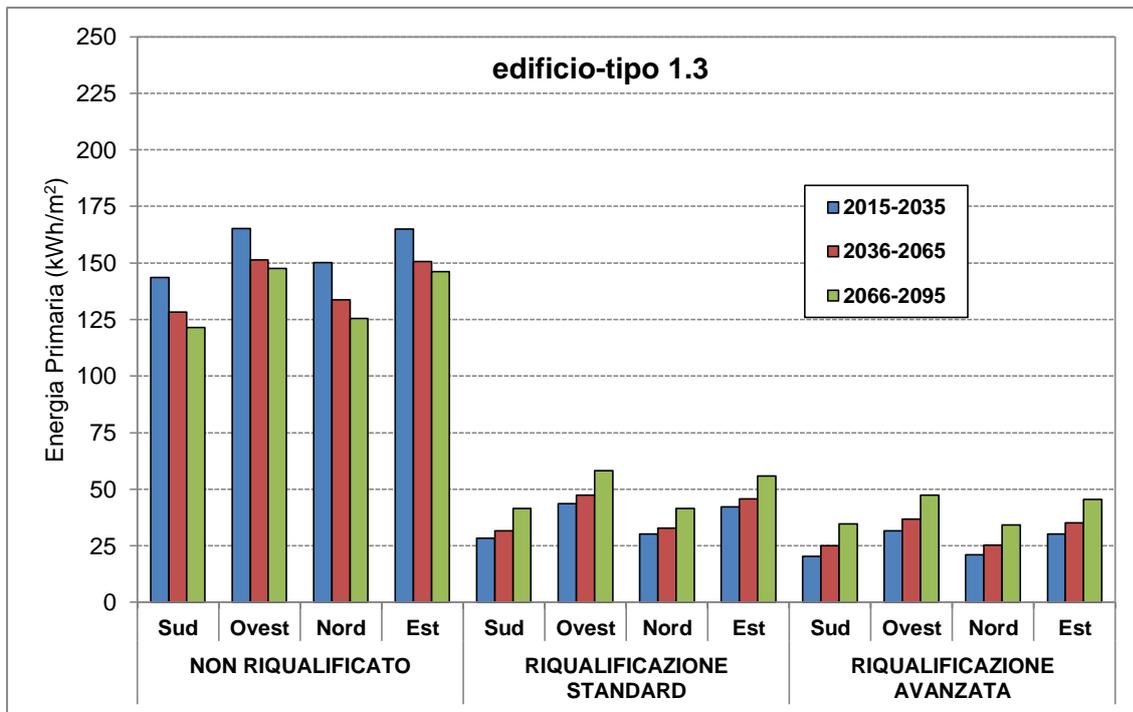


Figura 6-1 – Edificio-tipo 1.3-Indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale ed estiva al variare dell'orientamento dell'edificio per i tre differenti livelli di riqualificazione energetica

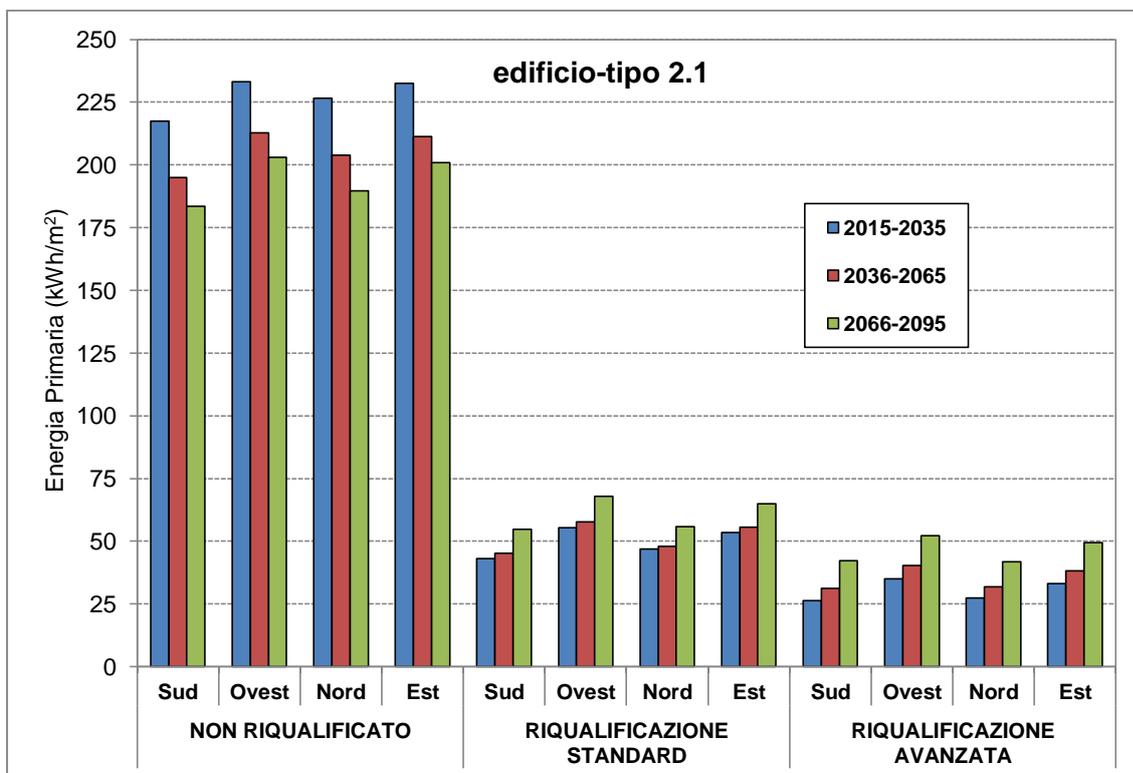


Figura 6-2 - Edificio-tipo 2.1- Indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale ed estiva al variare dell'orientamento dell'edificio per i tre differenti livelli di riqualificazione energetica.

In considerazione dei risultati di cui alla Figura 6-1 e alla Figura 6-2, l'orientamento Nord è considerato equivalente all'orientamento Sud e l'orientamento Est all'orientamento Ovest. Tale semplificazione è attribuibile al fatto che i modelli di edificio-tipo elaborati nella ricerca, sono edifici in linea nei quali la superficie finestrata frontale si discosta poco da quella posteriore (vedi Tabella 6-1).

Tabella 6-1 – Distribuzione percentuale della superficie finestrata nei diversi prospetti degli edifici-tipo.

Edificio-tipo	S _f frontale	S _f laterale	S _f posteriore
1.1	43%	14%	43%
1.2	44%	11%	45%
1.3	49%	4%	47%
2.1	46%	11%	43%
2.2	49%	6%	46%
2.3	44%	11%	44%

6.1 Analisi della Prestazione energetica

6.1.1 Effetto dei cambiamenti climatici sugli edifici non riqualificati

Gli effetti dei cambiamenti climatici sulla prestazione energetica degli Edifici-Tipo 1.3 e 2.1 non riqualificati sono illustrati nella Figura 6-3 e nella Tabella 6-2.

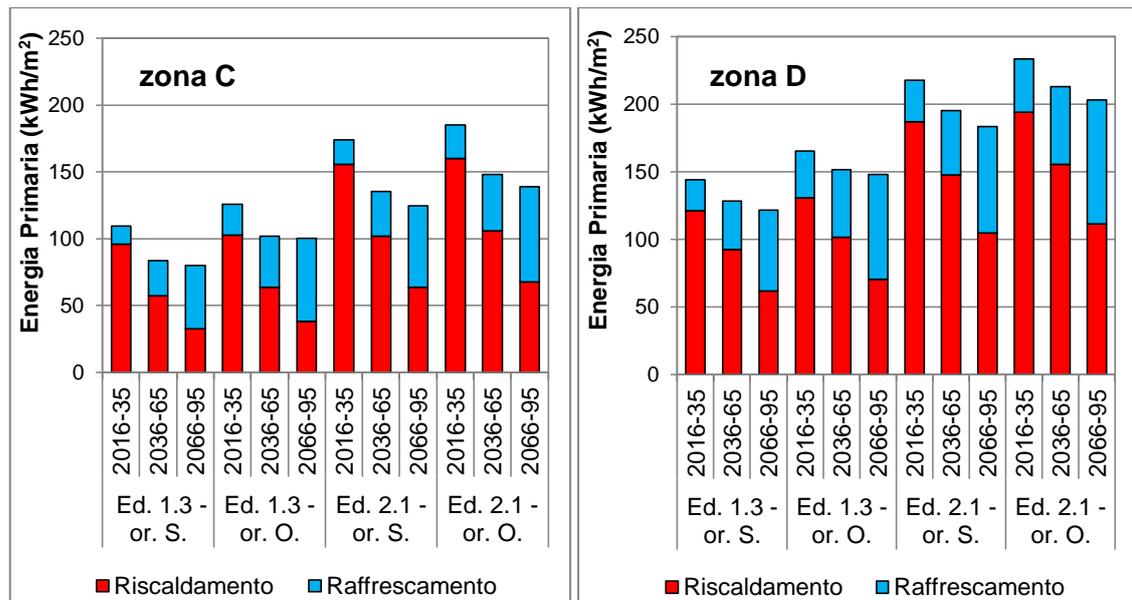


Figura 6-3 – Andamento dell'indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale ed estiva degli edifici tipo 1.3 e 2.1 al variare del periodo, della zona climatica e dell'orientamento

L'analisi dei grafici evidenzia come l'indice di prestazione energetica complessivo (EP_H+EP_C) di entrambe le tipologie di edifici non riqualificati⁵¹ tenda a migliorare a fronte del previsto cambiamento climatico in misura compresa fra l'8% e il 24% e sul medio termine e fra l'11 e il 28% sul lungo termine (vedi Tabella 6-2). Ciò è dovuto al fatto che, avendo gli edifici non riqualificati un fabbisogno per riscaldamento molto elevato (in media circa l'85% del fabbisogno complessivo annuo), l'aumento della temperatura esterna, determina una riduzione dei fabbisogni per riscaldamento in termini assoluti molto maggiore del corrispondente aumento del fabbisogno per raffrescamento (Berger et al., 2014). Infine, nel lungo periodo, si evidenzia come il fabbisogno energetico per raffrescamento degli edifici analizzati si avvicini al fabbisogno per riscaldamento e in alcuni casi lo eguagli o lo superi.

Tabella 6-2 - Valori assunti dell'indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale ed estiva degli edifici tipo 1.3 e 2.1 e, fra parentesi, differenze percentuali fra il clima attuale e i periodi futuri

edificio	periodo	Riscaldamento (kWh/m ²)	Raffrescamento (kWh/m ²)	Totale (kWh/m ²)
Zona Climatica C				
Ed. 1.3 or. S/N	2016-35	95.73	13.67	109.4
	2036-65	57.39 (-40%)	26.23 (+92%)	83.6 (-24%)
	2066-95	32.53 (-66%)	47.49 (+247%)	80.0 (-27%)
Ed. 1.3 or. O/E	2016-35	102.5	23.4	125.9
	2036-65	63.4 (-38%)	38.3 (+64%)	101.7 (-19%)
	2066-95	38.1 (-63%)	62.2 (+166%)	100.2 (-20%)
Ed. 2.1or. S/N	2016-35	155.5	18.4	173.9
	2036-65	101.8 (-35%)	33.6 (+83%)	135.5 (-22%)
	2066-95	63.8 (-59%)	60.7 (-35%)	124.5 (-28%)
Ed. 2.1 or. O/E	2016-35	160.2	25.0	185.1
	2036-65	106.0 (-34%)	42.0 (-34%)	148.0 (-20%)
	2066-95	67.8 (-58%)	71.0 (+185%)	138.8 (-25%)
Zona Climatica D				
Ed. 1.3 or. S/N	2016-35	121.2	22.7	143.9
	2036-65	92.6 (-24%)	35.9 (+58%)	128.5 (-11%)
	2066-95	61.8 (-49%)	59.7 (+163%)	121.5 (-16%)
Ed. 1.3 or. O/E	2016-35	130.8	34.7	165.5
	2036-65	101.7 (-22%)	49.9 (+44%)	151.6 (-8%)
	2066-95	70.3 (-46%)	77.6 (+123%)	147.9 (-11%)

⁵¹ Caratterizzati da tecnologie di involucro precedenti alla legge 373/76 e rapporto S/V compreso fra 0.47 e 0.61

Ed. 2.1or. S/N	2016-35	187.0	31.0	217.9
	2036-65	147.7 (-21%)	47.6 (+54%)	195.4 (-10%)
	2066-95	104.7 (-44%)	79.0 (+155%)	183.7 (-16%)
Ed. 2.1 or. O/E	2016-35	194.2	39.6	233.8
	2036-65	155.5 (-20%)	57.7 (+46%)	213.2 (-9%)
	2066-95	111.3 (-43%)	92.1 (+133%)	203.4 (-13%)

Per quanto attiene agli effetti dell'orientamento, si riscontra una più spiccata tendenza al miglioramento delle future prestazioni energetiche degli edifici orientati a Sud/Nord piuttosto che ad Ovest/Est e caratterizzati da un rapporto S_f/S_u più basso e un rapporto S/V più alto.

Tali caratteristiche consentono, infatti, da una parte di sfruttare positivamente la riduzione delle dispersioni per trasmissione, e dall'altra di risentire in maniera attenuata dell'impatto degli apporti solari caratterizzati, come ipotizzato nel paragrafo 2.3, dalla invarianza dei futuri livelli di radiazione solare (Pierangioli et al., 2017)

E' da sottolineare inoltre come la zona D, caratterizzata da escursioni stagionali più accentuate, risulti più critica rispetto alla zona C in ragione di fabbisogni di energia primaria più elevati sia per la climatizzazione invernale che per la climatizzazione estiva indipendentemente dalla tipologia, età e orientamento dell'edificio.

In sintesi è necessario precisare che la riduzione del fabbisogno energetico annuo non può essere considerato un elemento positivo in assoluto, qualora si considerino i valori assoluti dei consumi in gioco ed i diversi vettori energetici. Infatti i fabbisogni futuri per riscaldamento degli edifici non isolati se pur ampiamente ridotti, rimarranno molto significativi e i fabbisogni per raffrescamento potranno aumentare anche di oltre il 200% e verosimilmente ciò comporterà analoghi incrementi dei consumi di energia elettrica. Prevedendo, quindi, un probabile spostamento dei consumi residenziali dal gas all'energia elettrica, è necessario sottolineare come quest'ultimo vettore energetico presenti, allo stato attuale del "mix energetico nazionale", un fattore di conversione in energia primaria e un fattore di emissione atmosferica di CO_2 più penalizzanti rispetto agli altri vettori energetici (D.M.26/6/2015, 2015; Regione Emilia Romagna, 2015). Queste considerazioni mettono in evidenza come, anche a fronte del cambiamento climatico previsto sia necessario provvedere comunque all'adozione di adeguate misure per il contenimento dei consumi e delle emissioni climalteranti degli edifici esistenti.

6.1.2 Effetto dei cambiamenti climatici sull'efficacia delle strategie di riqualificazione

I risultati completi delle analisi energetiche sono riportati, in forma di grafico e in forma tabellare, nel paragrafo 3 “Risultati completi dei calcoli energetici” degli Allegati. Nel presente paragrafo, al fine di discutere attorno all'efficacia e alla risposta ai cambiamenti climatici delle diverse misure di efficientamento, si fa riferimento a titolo esemplificativo ai risultati relativi al caso dell'edificio tipo 2.1, zona climatica D, orientamento Ovest/Est.

6.1.2.1 Efficacia dell'isolamento termico dell'involucro opaco

L'isolamento termico dell'involucro è l'intervento che conduce alla maggiore riduzione in termini assoluti del fabbisogno termico mediato sui tre periodi analizzati (2016-2035, 2036-65 e 2066-95); in particolare la riduzione rispetto al caso base non riqualificato è del 65% con il livello di isolamento standard a norma dell'attuale DM 26/6/2015 (trasmittanze comprese fra 0,28 e 0,36 W/m²K); riduzione che sale al 70% con livello avanzato caratterizzato da trasmittanze comprese fra 0,20 e 0,24 W/m²K. Analizzando separatamente i fabbisogni per riscaldamento e raffrescamento (Figura 6-4 a) si evidenzia che l'isolamento dell'involucro opaco è maggiormente efficace nei confronti dei fabbisogni per riscaldamento (-72% e -79% su medio e lungo periodo) che per quelli di raffrescamento (-49% e -50% su medio e lungo periodo ovvero sostanzialmente stabile). Si deduce pertanto che il livello avanzato di isolamento termico contribuisce esclusivamente a ridurre ulteriormente il fabbisogno per riscaldamento, lasciando però pressoché inalterato il fabbisogno per raffrescamento raggiunto mediante il livello standard. Quest'ultima osservazione trova riscontro osservando l'evoluzione della prestazione energetica degli edifici riqualificati (Figura 6-4 b e Tabella 6-3): se con l'isolamento di livello standard si osserva una progressiva riduzione del fabbisogno totale (analogamente all'edificio non riqualificato), con l'isolamento avanzato la riduzione avviene solo nel medio termine per mantenersi stabile e persino invertire l'andamento nel lungo termine. Ciò è spiegabile considerando che il sensibile incremento delle temperature previsto dai modelli climatici contribuisce ad aumentare il peso che gli apporti solari estivi avranno nel bilancio energetico dell'edificio, rispetto alle dispersioni invernali per trasmissione attraverso i componenti opachi (Pierangioli et al., 2017).

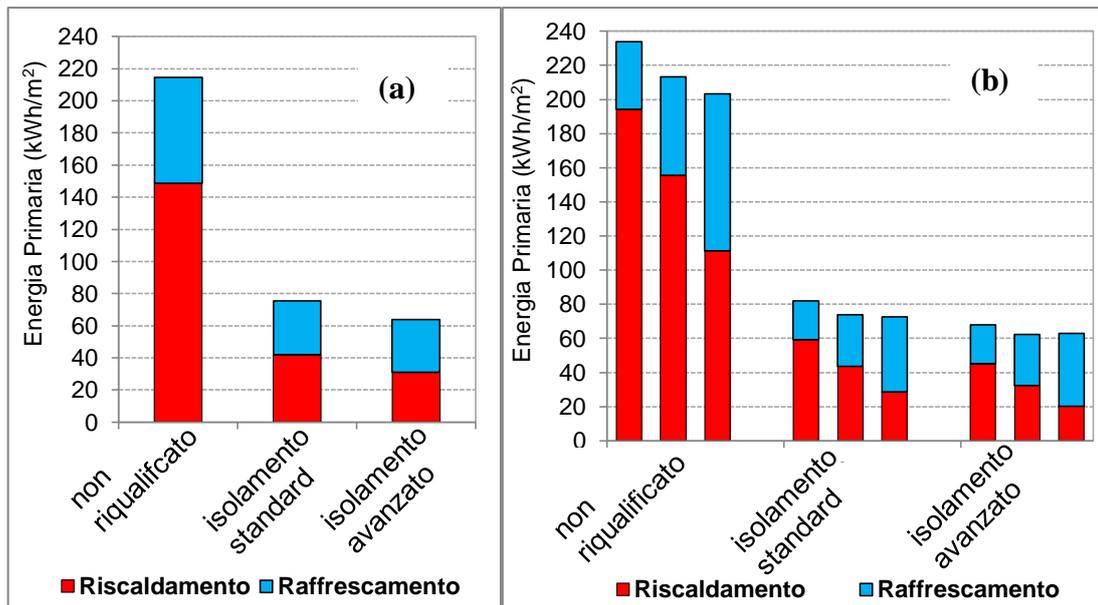


Figura 6-4 - Indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale ed estiva dei diversi livelli di isolamento termico dell'involucro. Media sui tre periodi (a) e per singolo periodo (b) (le barre da destra verso sinistra: corrispondono ai periodi 2016-2035, 2036-65, 2066-95)

Tabella 6-3 – Valori assunti dall' indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale, estiva e totale in funzione del periodo futuro e dei diversi livelli di isolamento termico dell'involucro .

intervento	periodo	Riscaldamento (kWh/m²)	Raffrescamento (kWh/m²)	Totale (kWh/m²)
Non riqualificato	2016-35	194.2	39.6	233.8
	2036-65	155.5	57.7	213.2
	2066-95	111.3	92.1	203.4
	media	148.6	66.1	214.7
Isolamento standard	2016-35	59.3 (-69%)	22.7 (-43%)	82.0 (-65%)
	2036-65	43.6 (-72%)	30.3 (-48%)	73.9 (-65%)
	2066-95	28.6 (-74%)	44.1 (-52%)	72.7 (-64%)
	media	41.9 (-72%)	33.5 (-49%)	75.5 (-65%)
Isolamento avanzato	2016-35	45.1 (-77%)	22.8 (-42%)	68.0 (-71%)
	2036-65	32.4 (-79%)	29.9 (-48%)	62.3 (-71%)
	2066-95	20.3 (-82%)	42.7 (-54%)	63.0 (-69%)
	media	31.1 (-79%)	32.9 (-50%)	64.0 (-70%)

6.1.2.1 Efficacia della sostituzione e della schermatura solare degli infissi

La sostituzione degli infissi esistenti, che abbiamo ipotizzato essere dotati di doppio vetro ($U_w = 3,3 \text{ W/m}^2\text{K}$), e l'inserimento delle schermature portano alla riduzione del fabbisogno di energia primaria totale del 23% con l'installazione di un infisso con telaio in legno e vetro doppio basso emissivo ($U_w = 2,1 \text{ W/m}^2\text{K}$). Come si evince dalla Figura

6-5 e dalla Tabella 6-4, l'adozione di un infisso con prestazioni avanzate (vetro triplo basso emissivo con telaio ad alte prestazioni in PVC con $U_w = 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$) fornisce un contributo di modesta entità. In termini assoluti i valori suddetti sono inferiori a quelli ottenuti con l'isolamento d'involucro, ma c'è da considerare che la sostituzione dei serramenti è attuabile liberamente dal singolo condomino, senza particolari difficoltà tecniche ed economiche. Da notare, infine, come la sostituzione del vetro, anche in assenza di schermatura, contribuisca in maniera significativa, oltre che alla riduzione del fabbisogno invernale, anche al risparmio di energia elettrica in regime estivo. Ciò è dovuto all'effetto combinato dell'isolamento termico che attenua le rientrate estive per trasmissione e del ridotto fattore solare dei vetri basso emissivi che contribuisce al controllo degli apporti solari. Con l'aggiunta delle schermature, l'efficacia estiva della sostituzione degli infissi è ulteriormente incrementata. Questo fa sì che l'inserimento delle schermature contribuisca, in modo sempre più efficace con il trascorrere del tempo, anche alla riduzione del fabbisogno di energia primaria totale annuo.

Da evidenziare, inoltre, l'efficacia l'installazione della sola schermatura non accompagnata dalla sostituzione dell'infisso che consente una riduzione del fabbisogno totale del 14% con una riduzione del solo fabbisogno estivo pari al 45%.

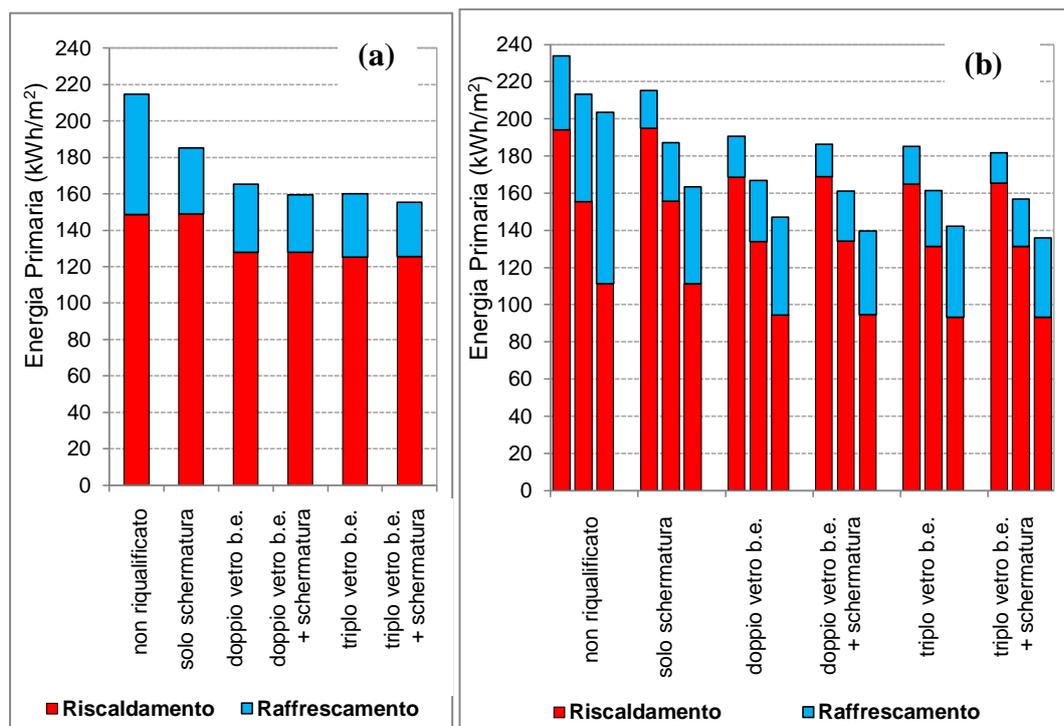


Figura 6-5 - Indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale ed estiva della configurazione non riqualificata a confronto con le diverse soluzioni di sostituzione degli infissi e installazione di schermature solari. Media sui tre periodi (a) e per singolo periodo (b) (le barre da destra verso sinistra: corrispondono ai periodi 2016-2035, 2036-65, 2066-95)

Tabella 6-4 – Valori assunti dall' indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale, estiva e totale in funzione del periodo futuro per gli interventi di sostituzione degli infissi e di installazione delle schermature.

intervento	periodo	Riscaldamento (kWh/m ²)	Raffrescamento (kWh/m ²)	Totale (kWh/m ²)
Non riqualificato	2016-35	194.2	39.6	233.8
	2036-65	155.5	57.7	213.2
	2066-95	111.3	92.1	203.4
	media	148.6	66.1	214.7
Solo schermatura	2016-35	194.9 (0%)	20.5 (-48%)	215.4 (-8%)
	2036-65	155.7 (0%)	31.4 (-46%)	187.1 (-12%)
	2066-95	111.2 (0%)	52.0 (-43%)	163.3 (-20%)
	media	148.8 (0%)	36.4 (-45%)	185.2 (-14%)
Vetro doppio b.e.	2016-35	168.4 (-13%)	22.3 (-44%)	190.7 (-18%)
	2036-65	134.0 (-14%)	32.8 (-43%)	166.8 (-22%)
	2066-95	94.5 (-15%)	52.6 (-43%)	147.1 (-28%)
	media	127.8 (-14%)	37.6 (-43%)	165.4 (-23%)
Vetro doppio b.e. + schermatura	2016-35	168.9 (-13%)	17.6 (-56%)	186.4 (-20%)
	2036-65	134.1 (-14%)	27.1 (-53%)	161.2 (-24%)
	2066-95	94.5 (-15%)	45.0 (-51%)	139.6 (-31%)
	media	128.0 (-14%)	31.4 (-52%)	159.4 (-26%)
Vetro triplo b.e.	2016-35	164.9 (-15%)	20.2 (-49%)	185.1 (-21%)
	2036-65	131.2 (-16%)	30.2 (-48%)	161.4 (-24%)
	2066-95	93.2 (-16%)	49.1 (-47%)	142.3 (-30%)
	media	125.4 (-16%)	34.8 (-47%)	160.1 (-25%)
Vetro doppio b.e. + schermatura	2016-35	165.4 (-15%)	16.4 (-59%)	181.8 (-22%)
	2036-65	131.2 (-16%)	25.5 (-56%)	156.7 (-26%)
	2066-95	93.2 (-16%)	42.8 (-54%)	136.1 (-33%)
	media	125.5 (-16%)	29.7 (-55%)	155.2 (-28%)

6.1.2.2 Efficacia della sostituzione del generatore di calore

La configurazione tecnica degli impianti di base è costituita da un generatore di calore a gas con climatizzatore split ad espansione diretta per il raffrescamento estivo.

Le varianti esaminate sono costituite dalla sostituzione della caldaia tradizionale a gas con caldaia a condensazione e con una pompa di calore (macchina che con l'inversione del ciclo fornisce anche il raffrescamento estivo): tale configurazione determina che i benefici dei miglioramenti si esplicano solo in regime invernale (Figura 6-6 a).

Osservando i valori di Figura 6-6 a si osserva che l'installazione della caldaia a condensazione produce una riduzione dei consumi medi annui attribuibili al solo riscaldamento del 24%, mentre la pompa di calore invertibile aria-aria porta ad un

decremento molto maggiore (48%). Tali effetti sono imputabili al miglior rendimento in riscaldamento della pompa di calore. Il fabbisogno estivo rimane invece invariato in quanto si è ipotizzato che il condizionatore esistente e la pompa di calore invertibile di nuova installazione abbiano lo stesso indice di efficienza energetica (come risulta dalle indagini riportate al paragrafo 4.1, da tempo, non esistono più in commercio sistemi split destinati esclusivamente al raffrescamento).

Osservando la risposta degli interventi di efficientamento impiantistico nei tre periodi futuri considerati, si può notare (Tabella 6-5) come sia la caldaia a condensazione che la pompa di calore mantengano costante la propria prestazione invernale rispetto al caso base, mentre ci si sarebbe potuti aspettare un incremento dell'efficacia della pompa di calore rispetto alla caldaia a condensazione all'aumentare della temperatura esterna (sorgente fredda).

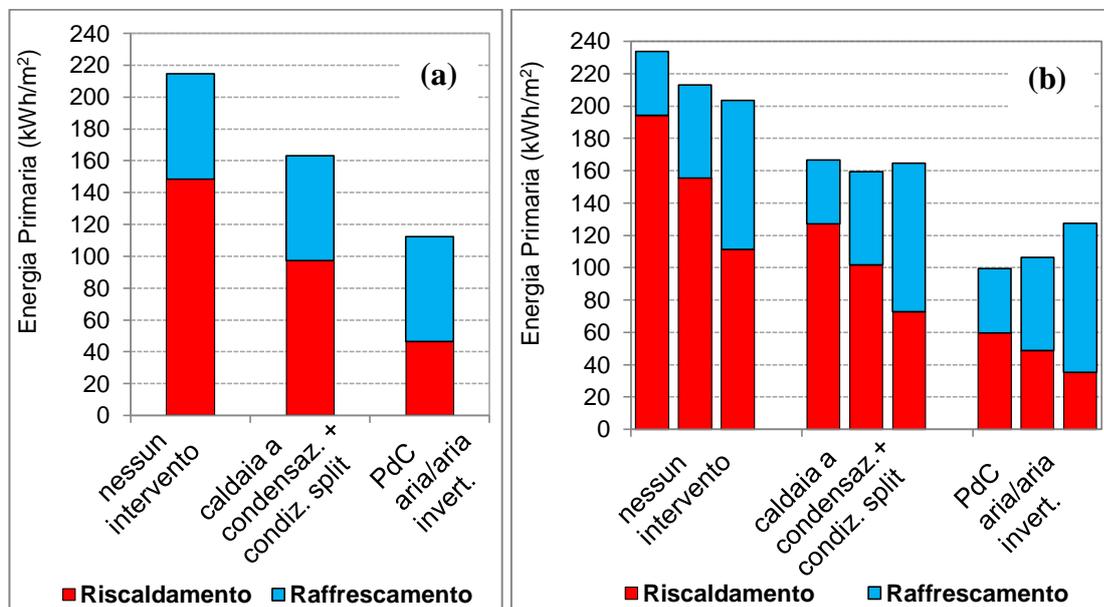


Figura 6-6 – Indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale ed estiva delle configurazioni non riqualificate (con caldaia tradizionale), e della configurazione riqualificata con caldaia a condensazione e con pompa di calore aria-aria. Media sui tre periodi (a) e per singolo periodo (b) (le barre da destra verso sinistra: corrispondono ai periodi 2016-2035, 2036-65, 2066-95)

Tabella 6-5 - Valori assunti dall' indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale, estiva e totale in funzione del periodo futuro per gli interventi di sostituzione del generatore di calore

intervento	periodo	Riscaldamento (kWh/m²)	Raffrescamento (kWh/m²)	Totale (kWh/m²)
Nessun intervento	2016-35	194.2	39.6	233.8
	2036-65	155.5	57.7	213.2
	2066-95	111.3	92.1	203.4
	media	148.6	66.1	214.7
Caldaia a condensazione + condiz. split	2016-35	127.1 (-35%)	39.6 (0%)	166.7 (-29%)
	2036-65	101.6 (-35%)	57.7 (0%)	159.4 (-25%)
	2066-95	72.7 (-35%)	92.1 (0%)	164.8 (-19%)
	media	97.2 (-35%)	66.1 (0%)	163.2 (-24%)
Pompa di calore aria/aria invertibile	2016-35	59.8 (-69%)	39.6 (0%)	99.3 (-58%)
	2036-65	48.7 (-69%)	57.7 (0%)	106.4 (-50%)
	2066-95	35.2 (-68%)	92.1 (0%)	127.3 (-37%)
	media	46.4 (-69%)	66.1 (0%)	112.5 (-48%)

6.1.2.3 Combinazione di differenti soluzioni di riqualificazione

Ai fini della comprensione dei grafici riportati nel presente paragrafo, nella Tabella 6-6 sono riportate le sigle relative alle diverse misure di efficienza energetica considerate. Le diverse soluzioni di efficientamento analizzate, frutto della combinazione di questi interventi con i relativi livelli prestazionali, sono state identificate tramite stringe di testo composte dalla sequenza delle suddette sigle (nell'ordine: involucro, infissi-schermature e generatore di calore). Ad esempio l'intervento "IE0_SI2-S_IC1" identifica una soluzione di efficientamento che non prevede alcun intervento sull'involucro opaco, mentre considera la sostituzione degli infissi esistenti con infissi nuovi con vetro triplo e schermatura mobile esterna e la sostituzione della caldaia a gas esistente con una nuova a condensazione.

Nella Figura 6-7 e nella relativa Tabella 6-7 sono riportati i valori medi sui tre periodi assunti dagli indici di prestazione energetica per la climatizzazione invernale ed estiva delle diverse combinazioni di interventi di riqualificazione ipotizzati.

Tabella 6-6 – Legenda delle sigle relative alle misure di efficienza energetica

IE0	Involucro opaco non isolato. (rif. paragrafo 4.4.4)
IE1	Livello standard ⁵² di isolamento termico dell'involucro opaco (rif. paragrafo 5.2)
IE2	Livello avanzato ⁵³ di isolamento termico dell'involucro opaco (rif. paragrafo 5.2)
SI0	Infissi esistenti: vetro doppio normale con telaio in legno (rif. paragrafo 4.4.4)
SI1	Livello infissi standard ⁵² : vetro doppio basso emissivo con telaio in legno (rif. paragrafo 5.2)
SI2	Livello infissi avanzato ⁵³ : vetro triplo basso emissivo con telaio in PVC (rif. paragrafo 5.2)
SI0-S SI1-S SI2-S	Infisso con schermatura solare (veneziana bianca esterna)
IC0	Impianto di climatizzazione esistente: caldaia tradizionale e condizionatore a espansione diretta tipo multi-split
IC1	Impianto di climatizzazione di livello standard ⁵⁴ : caldaia a condensazione e condizionatore a espansione diretta tipo multi-split
IC2	Impianto di climatizzazione di livello avanzato ⁵⁴ : pompa di calore reversibile a espansione diretta tipo multi-split

Si può osservare come la soluzione che presenta la maggiore riduzione del fabbisogno di energia primaria totale sia quella caratterizzata dal livello prestazionale più avanzato rispetto a tutte e tre le categorie di intervento considerate (IC2_SI2-S_IC2). Questa soluzione è anche quella che garantisce la maggiore riduzione del fabbisogno per

⁵² rispondente ai requisiti minimi di trasmittanza termica per edifici esistenti in funzione della zona climatica stabiliti dal DM 26/6/2015

⁵³ trasmittanze inferiori a quelle previste per l'edificio di riferimento ad energia quasi zero dal DM 26/6/2015

⁵⁴ rispondente ai requisiti minimi di efficienza e rendimento per edifici esistenti stabiliti dal DM 26/6/2015

riscaldamento. Da notare come la ripartizione dei consumi nella soluzione migliore (riscaldamento: 25%, raffrescamento 75%) sia esattamente inversa rispetto alla situazione dell'edificio non riqualificato (riscaldamento: 31%, raffrescamento 69%). Dalla Figura 6-7 si nota che tutte le soluzioni con livelli prestazionali più elevati sono caratterizzate, a fronte del cambiamento climatico atteso, da un netto sbilanciamento dei consumi a favore di quelli estivi. L'effetto combinato di aumento delle temperature ed efficientamento energetico del sistema determina, infatti, una riduzione estrema dei consumi per riscaldamento che raggiungono valori molto bassi (vedi Tabella 6-7).

Dalla Figura 6-8, si nota come in generale le soluzioni che garantiscono le migliori performance in termini di riduzione del fabbisogno annuo totale sono accomunate dalla presenza della pompa di calore invertibile aria-aria e delle schermature solari. Come già osservato un grado avanzato di isolamento termico dell'infisso non risulta invece essere tra le soluzioni maggiormente efficaci. La caldaia a condensazione è efficace solo se abbinata all'isolamento termico dell'involucro di livello avanzato. Per quanto riguarda il livello di isolamento termico dell'involucro è da rilevare come anche soluzioni con trasmittanze standard a norma di legge riescano a garantire una riduzione del fabbisogno totale maggiore dell'85% se abbinata alla pompa di calore. In particolare la soluzione costituita da un livello moderato di isolamento dell'involucro con infissi avanzati e provvisti di schermatura (codice IE1_SI2-S_IC2), è quella con il più basso indice di prestazione energetica per raffrescamento. Dai grafici completi pubblicati nel paragrafo 3 "Risultati completi dei calcoli energetici" degli Allegati, le medesime considerazioni, possono essere estese all'edificio 1.3, alla zona climatica C e all'orientamento Sud/Nord con le seguenti osservazioni:

- Negli edifici con rapporto S/V e S_f/S_u più basso orientamento Sud/Nord e collocati nelle località climatiche più miti (zona C), fattori questi che determinano consumi specifici per riscaldamento e raffrescamento già in partenza più contenuti, le differenze di prestazione fra le singole misure risultano meno evidenti;
- Gli edifici orientati ad Ovest/Est risultano più sensibili all'introduzione delle schermature solari per effetto del maggior irraggiamento diretto.

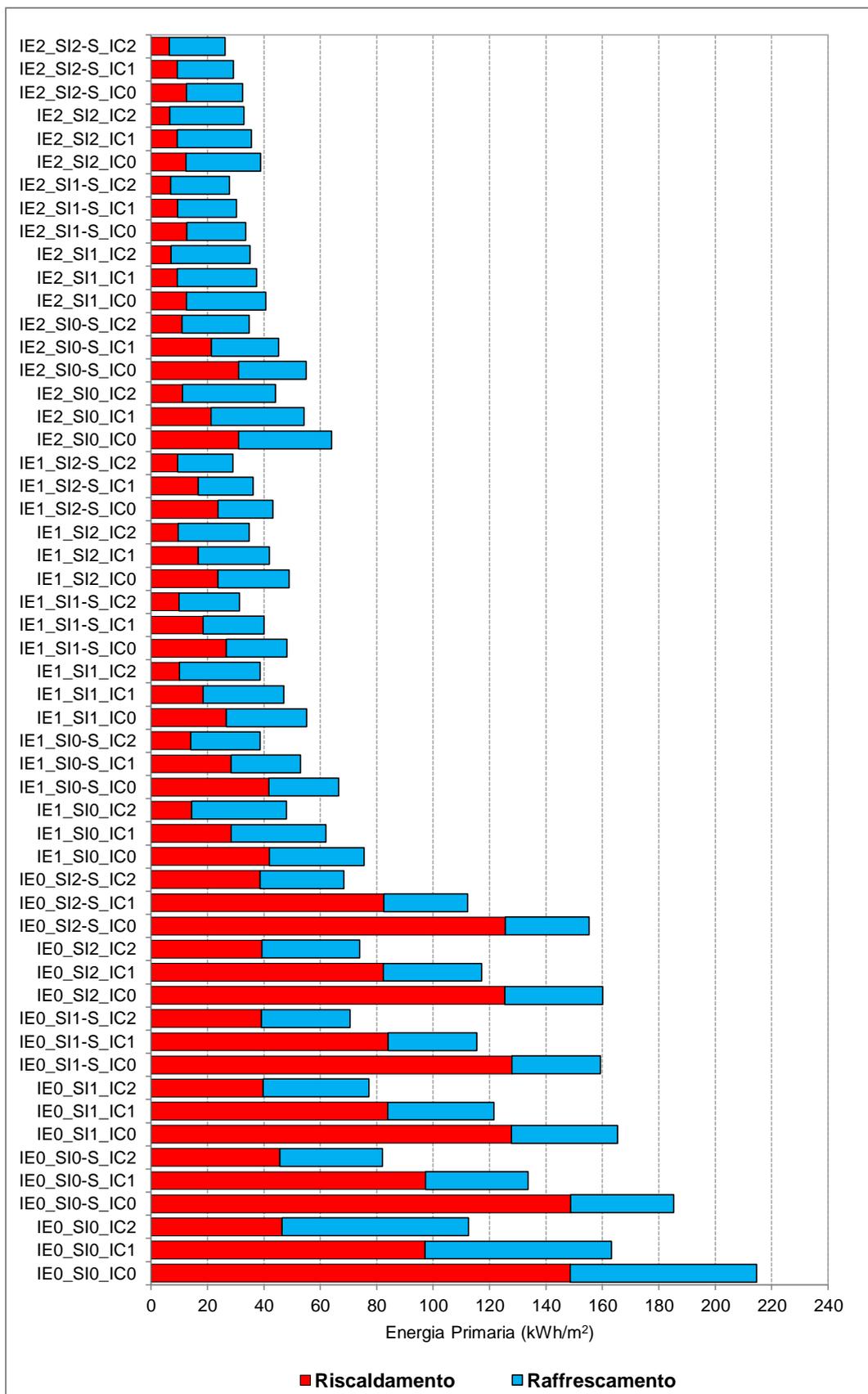


Figura 6-7 - Indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale ed estiva delle diverse combinazioni di interventi di riqualificazione ordinate per livello prestazionale: In basso lo stato non riqualificato (IE0_S10_IC0) e verso l'alto i livelli di riqualificazione più avanzati.

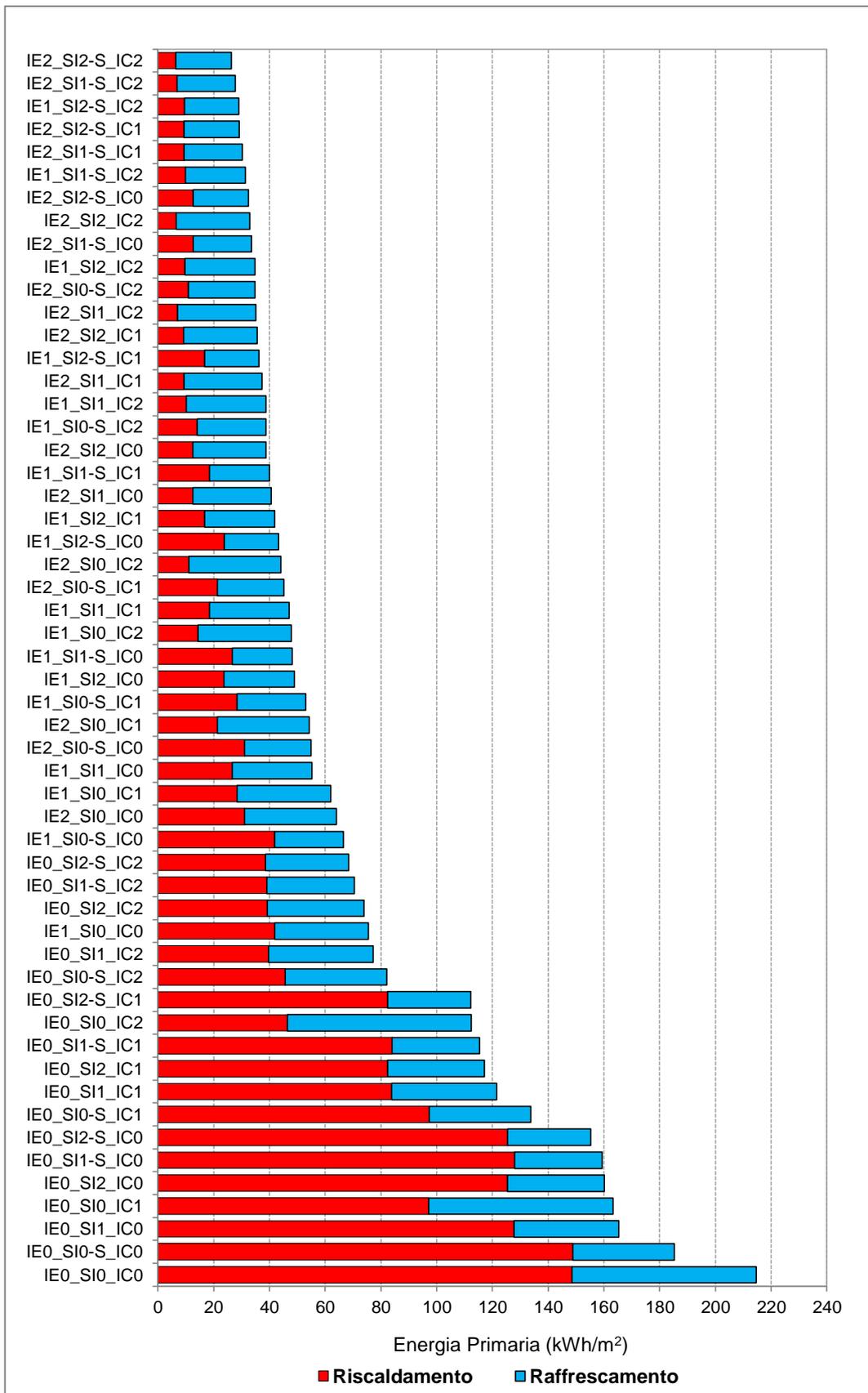


Figura 6-8 - Indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale ed estiva delle diverse combinazioni di interventi di riqualificazione ordinate per fabbisogno energetico. In basso lo stato non riqualificato (IE0_SIO_IC0).

Tabella 6-7 - Valori dell'indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale ed estiva delle diverse combinazioni di interventi di riqualificazione con la differenza percentuale dal caso base non riqualificato.

intervento	Riscaldamento (kWh/m²a)		Raffrescamento (kWh/m²a)		Totale (kWh/m²)	
caso base non riqualificato	148.6	(0%)	66.1	(0%)	214.7	(0%)
IE0_SIO_IC1	97.2	(-35%)	66.1	(0%)	163.2	(-24%)
IE0_SIO_IC2	46.4	(-69%)	66.1	(0%)	112.5	(-48%)
IE0_SIO-S_IC0	148.8	(0%)	36.4	(-45%)	185.2	(-14%)
IE0_SIO-S_IC1	97.3	(-35%)	36.4	(-45%)	133.7	(-38%)
IE0_SIO-S_IC2	45.7	(-69%)	36.4	(-45%)	82.1	(-62%)
IE0_SI1_IC0	127.8	(-14%)	37.6	(-43%)	165.4	(-23%)
IE0_SI1_IC1	83.9	(-44%)	37.6	(-43%)	121.5	(-43%)
IE0_SI1_IC2	39.7	(-73%)	37.6	(-43%)	77.3	(-64%)
IE0_SI1-S_IC0	128.0	(-14%)	31.4	(-52%)	159.4	(-26%)
IE0_SI1-S_IC1	84.0	(-43%)	31.4	(-52%)	115.4	(-46%)
IE0_SI1-S_IC2	39.1	(-74%)	31.4	(-52%)	70.5	(-67%)
IE0_SI2_IC0	125.4	(-16%)	34.8	(-47%)	160.1	(-25%)
IE0_SI2_IC1	82.4	(-45%)	34.8	(-47%)	117.2	(-45%)
IE0_SI2_IC2	39.2	(-74%)	34.8	(-47%)	74.0	(-66%)
IE0_SI2-S_IC0	125.5	(-16%)	29.7	(-55%)	155.2	(-28%)
IE0_SI2-S_IC1	82.5	(-44%)	29.7	(-55%)	112.2	(-48%)
IE0_SI2-S_IC2	38.6	(-74%)	29.7	(-55%)	68.4	(-68%)
IE1_SIO_IC0	41.9	(-72%)	33.5	(-49%)	75.5	(-65%)
IE1_SIO_IC1	28.4	(-81%)	33.5	(-49%)	62.0	(-71%)
IE1_SIO_IC2	14.4	(-90%)	33.5	(-49%)	47.9	(-78%)
IE1_SIO-S_IC0	41.8	(-72%)	24.7	(-63%)	66.5	(-69%)
IE1_SIO-S_IC1	28.4	(-81%)	24.7	(-63%)	53.0	(-75%)
IE1_SIO-S_IC2	14.1	(-91%)	24.7	(-63%)	38.7	(-82%)
IE1_SI1_IC0	26.6	(-82%)	28.6	(-57%)	55.2	(-74%)
IE1_SI1_IC1	18.5	(-88%)	28.6	(-57%)	47.1	(-78%)
IE1_SI1_IC2	10.1	(-93%)	28.6	(-57%)	38.7	(-82%)
IE1_SI1-S_IC0	26.7	(-82%)	21.5	(-67%)	48.2	(-78%)
IE1_SI1-S_IC1	18.5	(-88%)	21.5	(-67%)	40.1	(-81%)
IE1_SI1-S_IC2	9.9	(-93%)	21.5	(-67%)	31.4	(-85%)
IE1_SI2_IC0	23.7	(-84%)	25.2	(-62%)	48.9	(-77%)
IE1_SI2_IC1	16.7	(-89%)	25.2	(-62%)	41.9	(-80%)
IE1_SI2_IC2	9.7	(-93%)	25.2	(-62%)	34.8	(-84%)
IE1_SI2-S_IC0	23.8	(-84%)	19.5	(-71%)	43.2	(-80%)
IE1_SI2-S_IC1	16.7	(-89%)	19.5	(-71%)	36.2	(-83%)
IE1_SI2-S_IC2	9.5	(-94%)	19.5	(-71%)	29.0	(-87%)
IE2_SIO_IC0	31.1	(-79%)	32.9	(-50%)	64.0	(-70%)
IE2_SIO_IC1	21.3	(-86%)	32.9	(-50%)	54.3	(-75%)
IE2_SIO_IC2	11.2	(-92%)	32.9	(-50%)	44.1	(-79%)
IE2_SIO-S_IC0	31.1	(-79%)	23.9	(-64%)	55.0	(-74%)
IE2_SIO-S_IC1	21.3	(-86%)	23.9	(-64%)	45.3	(-79%)
IE2_SIO-S_IC2	10.9	(-93%)	23.9	(-64%)	34.8	(-84%)
IE2_SI1_IC0	12.6	(-92%)	28.1	(-58%)	40.6	(-81%)
IE2_SI1_IC1	9.3	(-94%)	28.1	(-58%)	37.4	(-83%)
IE2_SI1_IC2	7.0	(-95%)	28.1	(-58%)	35.1	(-84%)
IE2_SI1-S_IC0	12.7	(-91%)	20.9	(-68%)	33.6	(-84%)
IE2_SI1-S_IC1	9.4	(-94%)	20.9	(-68%)	30.3	(-86%)
IE2_SI1-S_IC2	6.9	(-95%)	20.9	(-68%)	27.8	(-87%)

IE2_SI2_IC0	12.5	(-92%)	26.3	(-60%)	38.8	(-82%)
IE2_SI2_IC1	9.3	(-94%)	26.3	(-60%)	35.6	(-83%)
IE2_SI2_IC2	6.6	(-96%)	26.3	(-60%)	32.9	(-85%)
IE2_SI2-S_IC0	12.6	(-92%)	19.8	(-70%)	32.4	(-85%)
IE2_SI2-S_IC1	9.3	(-94%)	19.8	(-70%)	29.2	(-86%)
IE2_SI2-S_IC2	6.5	(-96%)	19.8	(-70%)	26.3	(-88%)

Osservando l'evoluzione della prestazione energetica delle soluzioni più efficienti (Figura 6-9 e relativa Tabella 6-8) si conferma la tendenza descritta in precedenza: con l'avanzare del cambiamento climatico gli interventi di riqualificazione più efficienti diminuiscono la propria efficacia andando ad aumentare il fabbisogno di energia primaria totale.

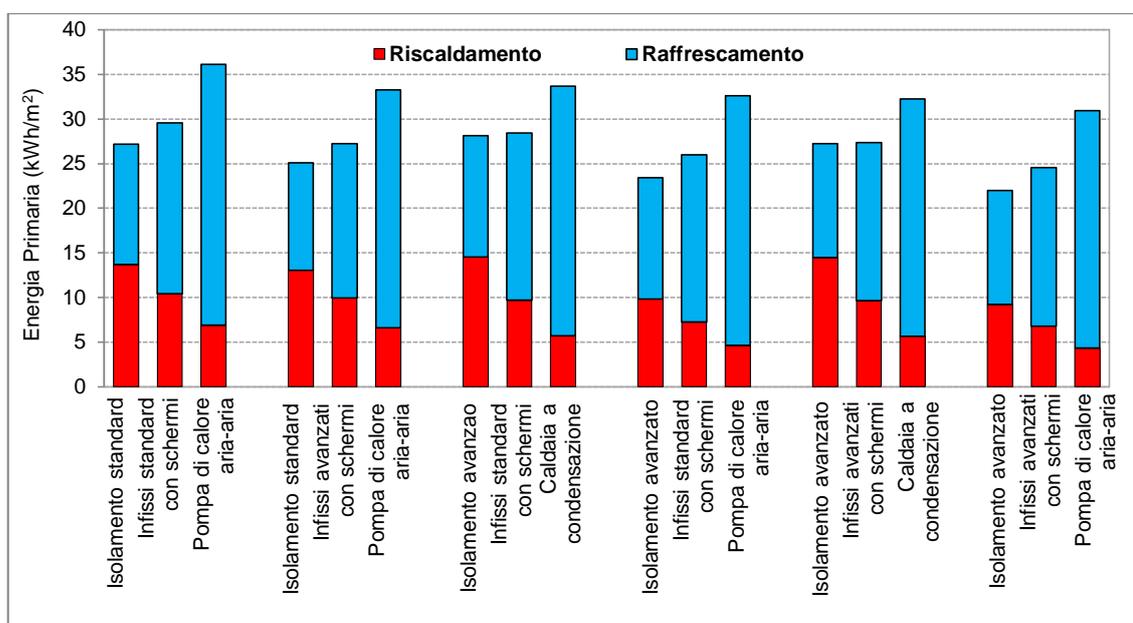


Figura 6-9 - Indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale ed estiva delle diverse combinazioni di interventi di riqualificazione con la migliore prestazione energetica. Le tre colonne da sinistra a destra rappresentano i tre periodi considerati: 2016-2035, 2036-2065, 2016-2095

Tabella 6-8 – Valori dell'indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale ed estiva delle diverse combinazioni di interventi di riqualificazione con la migliore prestazione energetica

intervento	periodo	Riscaldamento (kWh/m²)	Raffrescamento (kWh/m²)	Totale (kWh/m²)
Isolamento standard Infissi standard con schermi Pompa di calore aria-aria	2016-35	13.7 (-93%)	13.5 (-66%)	27.2 (-88%)
	2036-65	10.4 (-93%)	19.1 (-67%)	29.5 (-86%)
	2066-95	6.9 (-94%)	29.3 (-68%)	36.2 (-82%)
	media	9.9 (-93%)	21.5 (-67%)	31.4 (-85%)
Isolamento standard Infissi avanzati con schermi Pompa di calore aria-aria	2016-35	13.1 (-93%)	12.0 (-70%)	25.1 (-89%)
	2036-65	10.0 (-94%)	17.3 (-70%)	27.2 (-87%)
	2066-95	6.6 (-94%)	26.7 (-71%)	33.3 (-84%)
	media	9.5 (-94%)	19.5 (-71%)	29.0 (-87%)
Isolamento avanzato Infissi standard con schermi Caldaia a condensazione	2016-35	14.5 (-93%)	13.6 (-66%)	28.1 (-88%)
	2036-65	9.7 (-94%)	18.7 (-68%)	28.4 (-87%)
	2066-95	5.7 (-95%)	28.0 (-70%)	33.7 (-83%)
	media	9.4 (-94%)	20.9 (-68%)	30.3 (-86%)
Isolamento avanzato Infissi standard con schermi Pompa di calore aria-aria	2016-35	9.8 (-95%)	13.6 (-66%)	23.4 (-90%)
	2036-65	7.2 (-95%)	18.7 (-68%)	26.0 (-88%)
	2066-95	4.6 (-96%)	28.0 (-70%)	32.6 (-84%)
	media	6.9 (-95%)	20.9 (-68%)	27.8 (-87%)
Isolamento avanzato Infissi avanzati con schermi Caldaia a condensazione	2016-35	14.4 (-93%)	12.8 (-68%)	27.2 (-88%)
	2036-65	9.6 (-94%)	17.7 (-69%)	27.4 (-87%)
	2066-95	5.7 (-95%)	26.6 (-71%)	32.2 (-84%)
	media	9.3 (-94%)	19.8 (-70%)	29.2 (-86%)
Isolamento avanzato Infissi avanzati con schermi Pompa di calore aria-aria	2016-35	9.2 (-95%)	12.8 (-68%)	22.0 (-91%)
	2036-65	6.8 (-96%)	17.7 (-69%)	24.5 (-88%)
	2066-95	4.3 (-96%)	26.6 (-71%)	30.9 (-85%)
	media	6.5 (-96%)	19.8 (-70%)	26.3 (-88%)

6.2 Individuazione delle soluzioni economicamente ottimali: effetti del parametro Costo globale/Prestazione Energetica

Sulla base dei risultati delle simulazioni riportati nel paragrafo precedente è stato calcolato il costo globale dei diversi interventi di riqualificazione energetica al variare degli scenari economici ipotizzati.

Coerentemente con le indicazioni del regolamento europeo (Commissione Europea, 2012) i risultati dei calcolo energetico ed economico sono stati elaborati mediante la seguente metodologia:

- I dati sono stati inseriti in grafici a dispersione che, come quello esemplificato nella Figura 6-10, riportano nell'asse delle ascisse l'indice di prestazione energetica annuo per climatizzazione invernale ed estiva ($EP_H + EP_C$) in kWh/m^2 di superficie utile dell'edificio e nell'asse delle ordinate il costo globale degli interventi in $\text{€}/\text{m}^2$ di superficie utile dell'edificio;
- Il bordo inferiore dell'area segnata dai punti dei diversi interventi costituisce la curva del costo globale minimo al variare della prestazione energetica dell'edificio. Su questa è possibile individuare l'intervento di riqualificazione ottimale caratterizzato dal livello di costo globale più basso (punto di minimo della curva – nell'esempio di Figura 6-10, il punto “3”);

La sua posizione sull'ascissa indica il corrispondente livello di prestazione energetica. Se due o più interventi di riqualificazione presentano lo stesso costo, la soluzione ottimale sarà quella che presenta il fabbisogno inferiore di energia primaria.

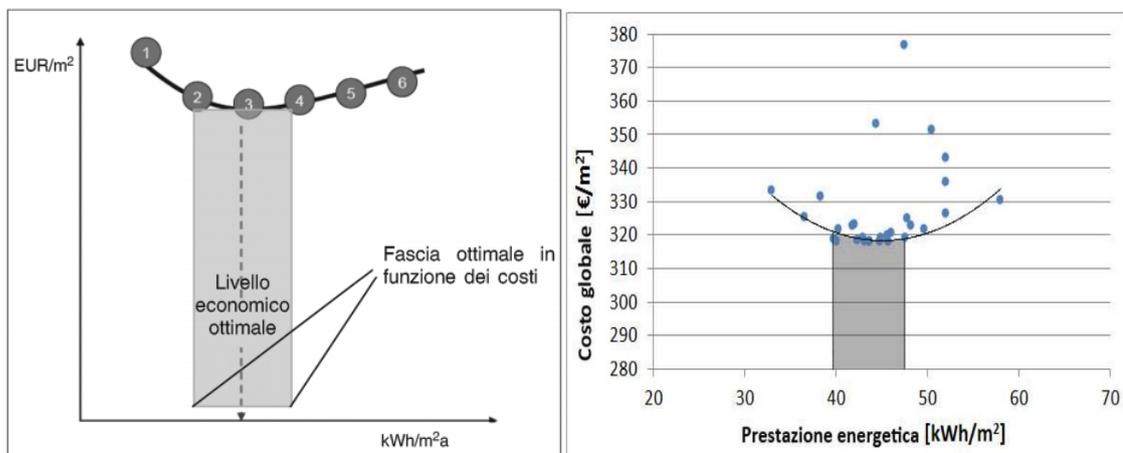


Figura 6-10 – Rappresentazione grafiche del rapporto energia primaria/costo globale di diverse misure di efficienza energetica ai fini dell'individuazione del livello di prestazione energetica ottimale (area grigia) in funzione del costo globale secondo la metodologia del Regolamento delegato UE n. 244/2012 (Commissione Europea, 2012; Ministero dello Sviluppo Economico, 2013)

6.2.1 Costo globale degli interventi al variare degli scenari

La serie completa dei grafici “Costo Globale/Indice di Prestazione Energetica⁵⁵” degli interventi di riqualificazione proposti in funzione della tipologia edilizia, della località climatica e dell'orientamento al variare degli scenari climatici ed economici ipotizzati è riportata nel punto 4 degli Allegati “Risultati completi dei calcoli economici”.

⁵⁵ L'indice di prestazione energetica riportato sui grafici è il valore medio sui tre periodi futuri.

Nell'analisi dei risultati i diversi scenari saranno identificati sinteticamente con una stringa alfanumerica composta con le sigle identificative riportate in Tabella 6-9. Ad esempio la sigla "noCC_vu50_peB_ts5" corrisponde allo scenario con assenza di cambiamento climatico, vita utile dell'edificio di 50 anni, moderato incremento dei prezzi dei vettori energetici e tasso di sconto del 5%.

Tabella 6-9 – Legenda dei parametri relativi agli scenari climatici ed economici .

Parametro	Valore caratteristico	Sigla
Evoluzione climatica	Nessun cambiamento rispetto al clima attuale	siCC
	Scenario concentrazione GHG pessimistico : RCP 8,5	noCC
Vita utile prevista degli edifici	50 anni (fino al 2065)	vu50
	80 anni (fino al 2095)	vu80
Evoluzione prezzi dei vettori energetici	Incremento elevato : scenario 2009 di riferimento del Regolamento UE 244/2012, caratterizzato da prezzi del gas in costante aumento e prezzi dell'energia elettrica in rapida stabilizzazione (vedi paragrafo 3.3.1 della Tesi);	peA
	Incremento moderato : scenario aggiornato al 2016, caratterizzato da un progressiva riduzione dell'incremento annuo dei prezzi energetici (vedi paragrafo 3.3.1).	peB
Tasso di sconto reale	Basso: 3% (approccio attento ai benefici che gli investimenti nell'efficienza energetica apportano agli occupanti degli edifici per l'intero ciclo vita dell'investimento)	ts3
	Alto: 5% (approccio commerciale alla valutazione degli investimenti)	ts5

A titolo esemplificativo e di chiarimento, nella Figura 6-11 e nella Figura 6-12 sono riportati i grafici di due edifici e due scenari economici che presentano caratteristiche opposte ed "estreme" rispetto al panorama indagato. La Figura 6-11 riguarda l'edificio-tipo 1.3 con orientamento Sud/Nord, situato in zona climatica C. Questo edificio, in ragione del clima mite, dell'orientamento, della compattezza dell'involucro edilizio ($S/V=0,47$), della ridotta superficie finestrata ($S_f/S_u=0,16$), presenta un fabbisogno iniziale più contenuto e quindi una minore sensibilità agli interventi di riqualificazione (vedi Figura 3.1 degli Allegati). Le condizioni economiche analizzate prevedono un tasso di sconto al 5%, un basso incremento dei prezzi energetici e una vita utile dell'edificio pari a 50 anni. Questo tipo di scenario economico è, in generale, favorevole a soluzioni di efficientamento caratterizzate da un basso costo d'investimento iniziale e da un livello intermedio di prestazione energetica. I risultati

rappresentati nel grafico e nella Tabella 6-10 mostrano chiaramente che, in tale situazione, le soluzioni migliori dal punto di vista energetico non coincidono con le soluzioni ottimali dal punto di vista del costo globale. In generale è possibile affermare che questo scenario è caratterizzato da una bassa correlazione fra prestazione energetica e costo globale degli interventi.

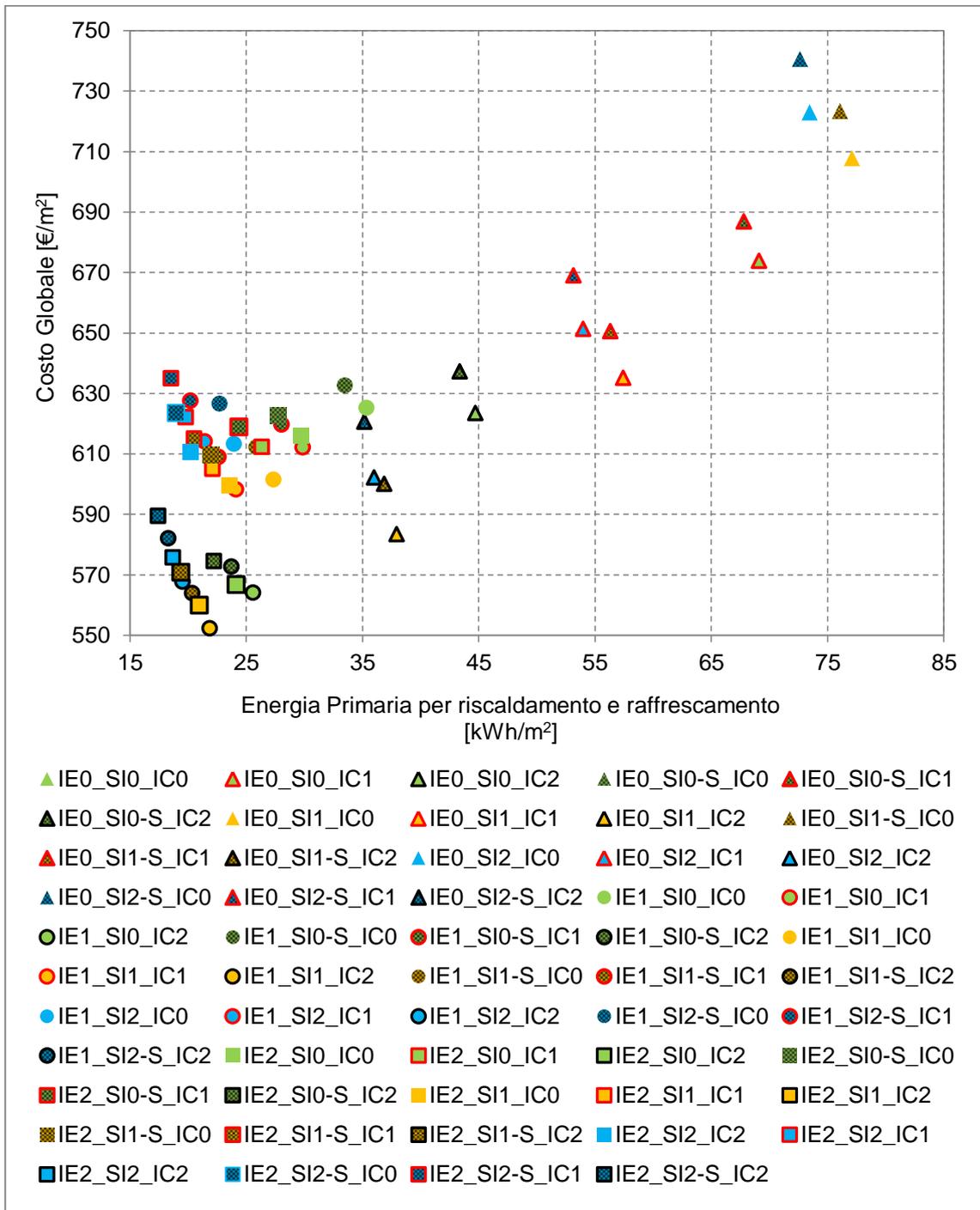


Figura 6-11 – Grafico “Costo Globale / Indice di Prestazione Energetica” relativo all’edificio-tipo 1.3 con orientamento Sud/Nord, situato in zona climatica C con scenario di riferimento con cambiamento climatico, tasso di sconto al 5%, evoluzione dei prezzi energetici ottimistica e vita utile pari a 80 anni

Tabella 6-10 – Costo globale e Prestazione energetica delle due soluzioni che presentano il valore minimo per i due indici, relativamente relativo all'edificio-tipo 1.3 con orientamento Sud/Nord, situato in zona climatica C con scenario di riferimento con cambiamento climatico, tasso di sconto al 5%, evoluzione dei prezzi energetici ottimistica e vita utile pari a 80 anni

Intervento	Costo globale (€/m²)	Indice di Prestazione Energetica (kWh/m²)
Isolamento avanzato Infissi avanzati con schermi Pompa di calore aria-aria	589,5	17,4
Isolamento standard Infissi standard con schermi Pompa di calore aria-aria	552,3	21,9

All'opposto, nella Figura 6-12, possiamo analizzare il caso dell'edificio-tipo 2.1 posto in zona climatica D con orientamento Ovest/Est. Questo edificio risulta, a causa del maggiore rapporto S/V (0,61) e S_f/S_u (0,18), della zona climatica meno mite e dell'orientamento sfavorevole (maggiori apporti estivi, minori apporti invernali), maggiormente energivoro e, conseguentemente, presenta una più spiccata sensibilità agli interventi di efficientamento. Lo scenario economico selezionato, in ragione del tasso di sconto basso (3%), dell'elevato incremento dei costi energetici e della vita utile estesa è favorevole agli interventi di riqualificazione più performanti e caratterizzati da un maggiore costo d'investimento iniziale. In questo caso, si vede dalla Tabella 6-11, come le condizioni al contorno economiche determinino, al contrario della situazione precedente, una stretta correlazione fra prestazione energetica e costo globale. In pratica, gli interventi energeticamente più efficienti, risultano ottimali anche dal punto di vista dei costi. L'intervento ottimale è caratterizzato da un livello prestazionale dell'involucro opaco di tipo avanzato e dalla presenza delle schermature. Si distingue dall'intervento più performante sotto il profilo esclusivamente energetico, solo per la presenza del vetro doppio al posto del vetro triplo. Il maggior costo iniziale delle misure di efficienza energetica con soluzione avanzata, è infatti ripagato dal minor consumo energetico futuro, che in ragione del tasso di sconto basso e dell'elevato costo dei vettori energetici, si traduce, una volta attualizzato in un risparmio economico significativo.

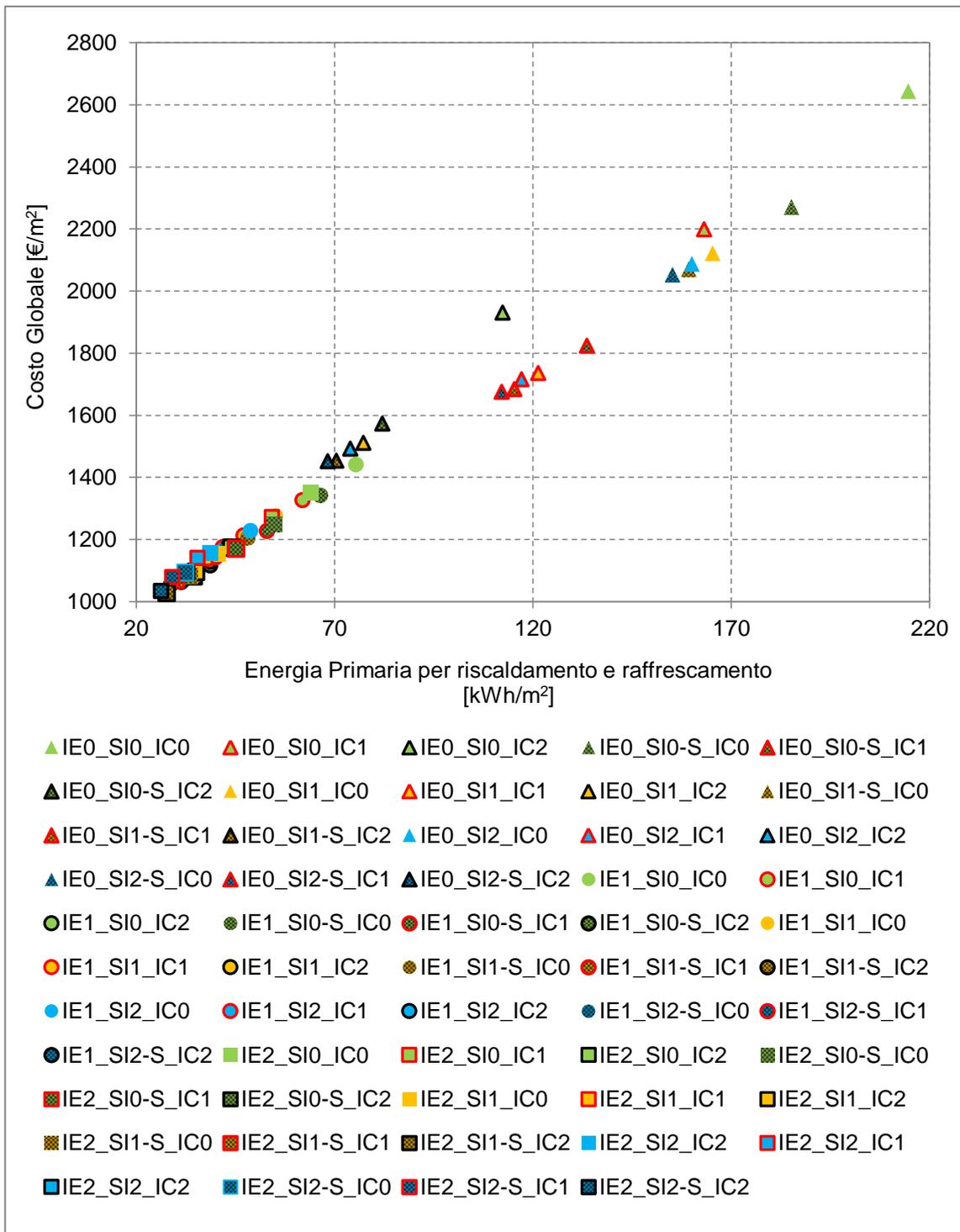


Figura 6-12 - Grafico “Costo Globale / Indice di Prestazione Energetica” relativo all’edificio-tipo 2.1 con orientamento Ovest/Est, situato in zona climatica D con scenario di riferimento con cambiamento climatico, tasso di sconto al 3%, evoluzione dei prezzi energetici pessimistica e vita utile pari a 50 anni.

Tabella 6-11 – Costo globale e Prestazione energetica delle due soluzioni che presentano il valore minimo per i due indici, relativamente relativo all'edificio-tipo 2.1 con orientamento Ovest/Est, situato in zona climatica D con scenario di riferimento con cambiamento climatico, tasso di sconto al 3%, evoluzione dei prezzi energetici pessimistica e vita utile pari a 50 anni.

Intervento	Costo globale (€/m²)	Indice di Prestazione Energetica (kWh/m²)
Isolamento avanzato Infissi avanzati con schermi Pompa di calore aria-aria	1034,1	26,3
Isolamento avanzato Infissi standard con schermi Pompa di calore aria-aria	1027,3	27,8

Nella Figura 6-13, i grafici precedenti sono riproposti uniformando le scale dei valori degli assi. Questo ci permette di apprezzare la diversa dispersione dei risultati. Mentre nel primo caso (edificio meno energivoro) gli investimenti di efficientamento energetico, si trovano nell'intervallo di costo $552,3 \div 782,2$ €/m² e nell'intervallo di prestazione energetica $17,4 \div 93,9$ kWh/m², nel secondo caso (edificio più energivoro) i diversi interventi di riqualificazione si trovano nell'intervallo di costo $1027,3 \div 2644,5$ €/m² e nell'intervallo di prestazione energetica $26,3 \div 214,7$ kWh/m². Oltre all'aumento in valore assoluto dei costi globali e dell'indice di prestazione energetica del secondo caso rispetto al primo, è possibile osservare la maggiore dispersione dei risultati. Questi risultati testimoniano come, al variare delle caratteristiche tipologiche e tecnologiche dell'edificio e al variare degli scenari economici e climatici che si ipotizza possano verificarsi, le differenze che possono essere molto significative dei diversi interventi di riqualificazione tanto da rendere necessaria un'accurata valutazione per evitare soluzioni di efficientamento non ottimali.

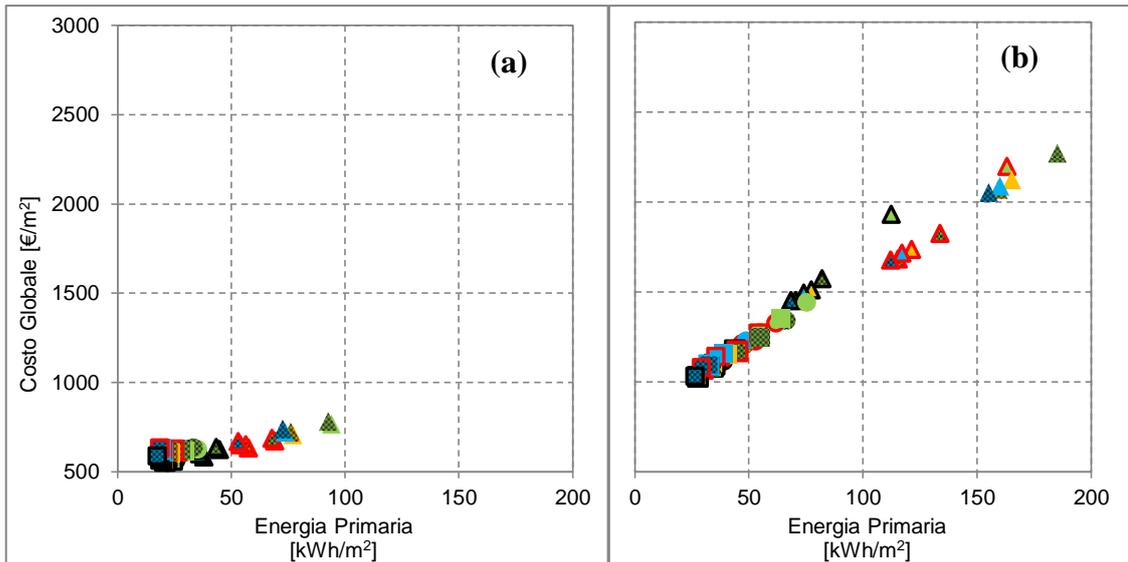


Figura 6-13 - Grafici “Costo Globale / Indice di Prestazione Energetica” relativo agli scenari “vu50_siCC_peB_ts5” (a) e “vu80_siCC_peA_ts3” (b)

Al fine di valutare la sensibilità del Costo Globale al variare dei parametri economici e climatici, nella Figura 6-14 e nella Figura 6-15 si riportano valori di costo globale della soluzione di efficientamento più avanzata (isolamento dell’involucro avanzato, vetro triplo basso emissivo, pompa di calore aria-aria reversibile) applicata ai due casi di edificio visti precedentemente (edificio-tipo 1.3 e edificio-tipo 2.1) al variare dello scenario economico di riferimento e in funzione dell’intensità del cambiamento climatico.

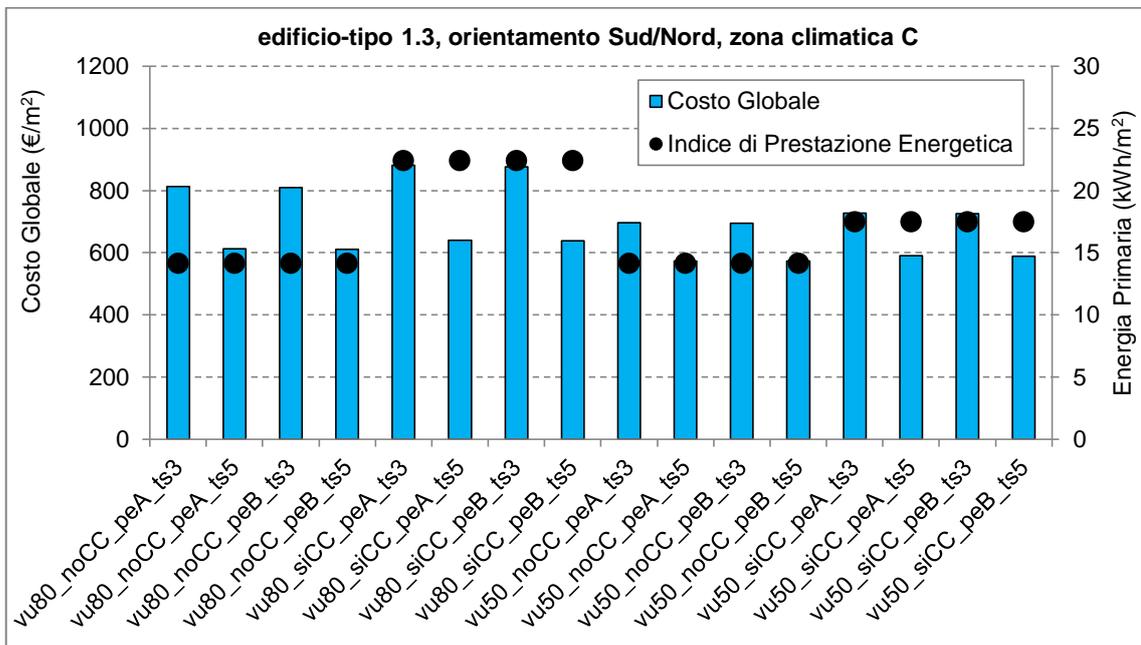


Figura 6-14 – Costo globale e indice di prestazione energetica al variare degli scenari economici (edificio-tipo 1.3, orientamento Sud/Nord, zona climatica C)

Dall'analisi dei grafici emerge come il fattore economico che condiziona maggiormente il costo globale degli interventi di riqualificazione è il tasso di sconto. Considerando una vita utile di 80 anni la variazione del tasso di sconto dal 3% al 5% determina una riduzione media del costo globale del 26%; considerando una vita utile di 50 anni tale riduzione media è pari al 19%. Anche la vita utile dell'edificio, ovvero il periodo di calcolo dell'investimento, risulta essere un parametro significativo ai fini della valutazione dell'intervento; è evidente come al suo ridursi la differenza in termini di costo globale fra i diversi scenari si riduce significativamente, così come la differenza fra diversi tipi di interventi. L'effetto dei diversi andamenti futuri del prezzo dei combustibili ipotizzati, essendo inferiore all'1% per tutte le combinazioni delle altre variabili, risulta invece essere trascurabile.

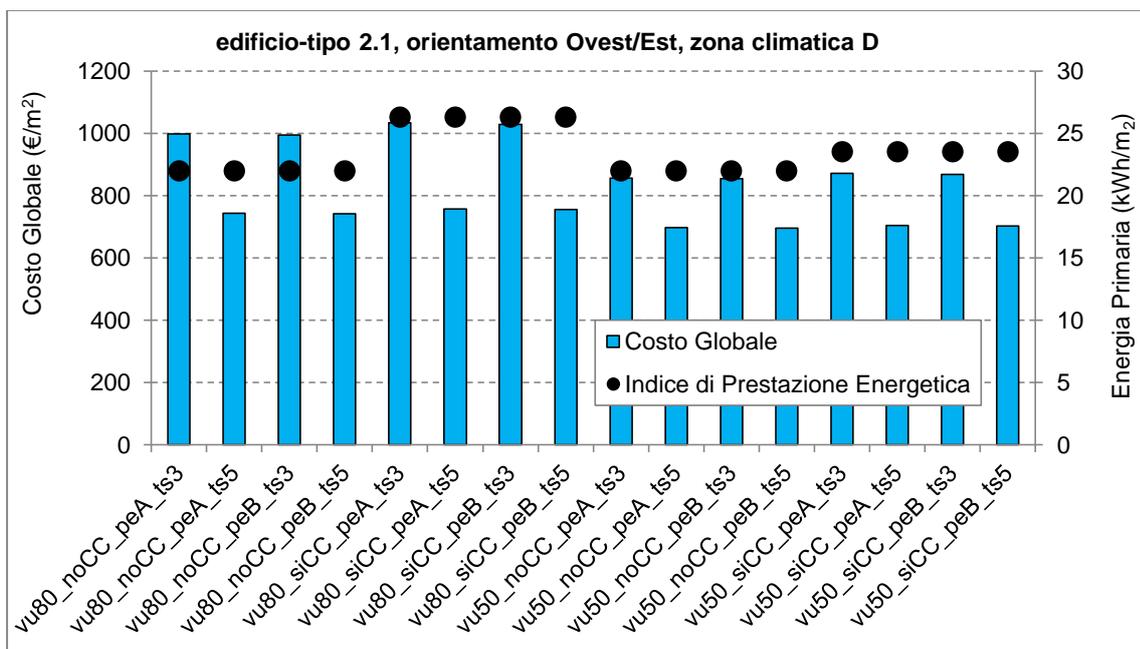


Figura 6-15 - Costo globale e indice di prestazione energetica al variare degli scenari economici (edificio-tipo 2.1, orientamento Ovest/Est, zona climatica D)

Per quanto riguarda l'effetto dei cambiamenti climatici, dai grafici si osserva come gli effetti sui consumi energetici, discussi nel paragrafo 6.1.2, che risultavano piuttosto consistenti, si traducano in differenze nel costo globale dell'intervento analizzato abbastanza limitate e comprese fra l'1% e il 4%, in funzione della vita utile e del tasso di sconto. Di là da ogni considerazione di carattere energetico, i risultati mostrano che l'affidabilità delle soluzioni è influenzata in modo decisivo sia dagli scenari economici ipotizzati sia dalle condizioni di partenza delle qualità energetiche del fabbricato. Da qui nasce l'esigenza di individuare le soluzioni meno affette dall'incertezza degli scenari,

ovvero più capaci di adattarsi alla loro mutevolezza e che abbiamo definito soluzioni *robuste*.

6.2.2 Individuazione degli interventi di riqualificazione più *robusti*

Per ciascuno dei 128 casi analizzati è stato elaborato un grafico “Costo Globale/Indice di prestazione Energetica” che permette di stilare una graduatoria dei 54 interventi di riqualificazione energetica proposti individuando per ciascun scenario quelli con il minore costo globale secondo la metodologia descritta.

In particolare, per ogni scenario, oltre alla soluzione considerata “ottimale”, sono state considerate “accettabili” quelle soluzioni il cui costo globale si discosta da quello ottimale dello scenario di non più di 10 €/m² (Figura 6-16). Tale valore corrisponde ad un incremento di circa 1,5% rispetto al costo globale ottimale mediato su tutti gli scenari ipotizzati.

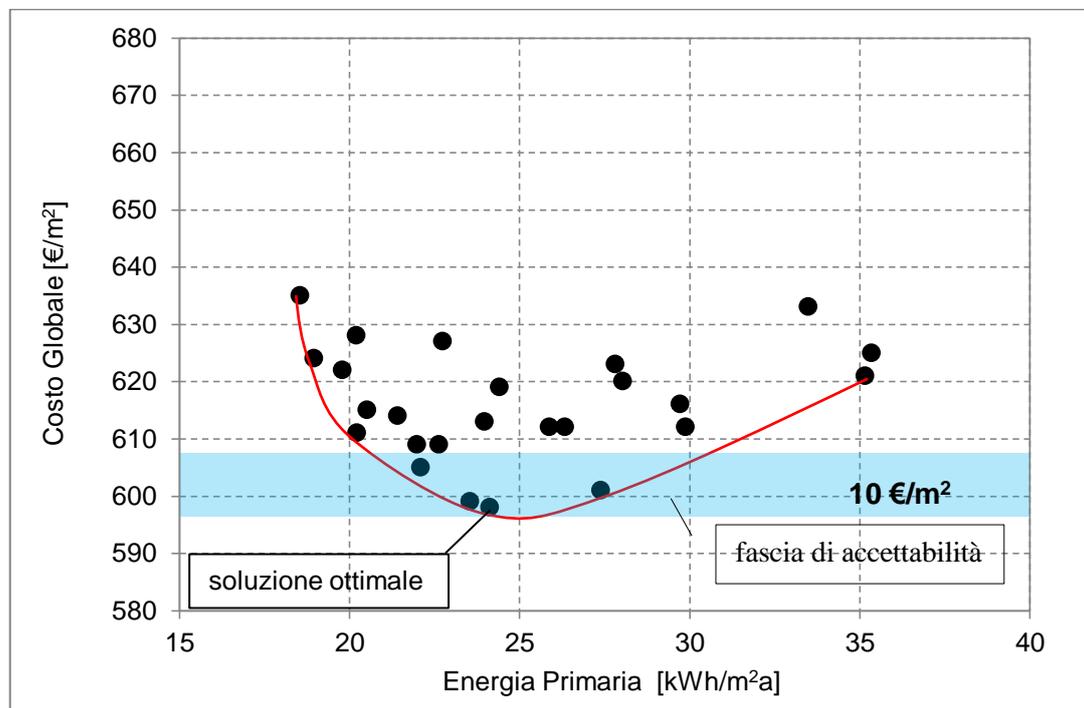


Figura 6-16 – Esempio di selezione delle soluzioni di efficientamento considerate “accettabili” in funzione del costo globale.

Tale approccio permette di tenere in considerazione il fatto che in alcuni scenari a causa della prestazione energetica dell’edificio in rapporto al contesto climatico e della particolare combinazione e dei parametri economici le differenze in termini di costo globale fra le diverse soluzioni di riqualificazione sono piuttosto ridotte. In questi casi la

curva di costo esemplificata in Figura 6-16 si appiattisce e il ventaglio di soluzioni con costo globale accettabile a disposizione del progettista si amplia a favore di una libertà di scelta che consenta di tenere conto di eventuali altri vincoli di carattere architettonico, tecnologico o normativo. Le soluzioni “accettabili”, oltre a quella ottimale variano, infatti da 1 a 4 in funzione dello scenario considerato.

Nella Tabella 6-12 si riportano, a titolo esemplificativo per il solo edificio-tipo 1.3 con orientamento Sud/Nord, posto in zona climatica D, gli interventi di riqualificazione ottimali e quelli classificati come “accettabili” secondo il criterio suddetto. Nel caso di interventi che presentano un costo globale – C_G - simile, prevale l'intervento con il minor fabbisogno di energia primaria - EP.

Per l'analisi dei risultati completi riguardanti entrambe gli edifici-tipo, gli orientamenti e le zone climatiche considerate si rimanda ai grafici e alle tabelle riportate al punto 4 degli Allegati “Risultati completi dei calcoli economici”.

Questo tipo di elaborazione dei risultati della ricerca è finalizzata alla successiva individuazione delle soluzioni più *robuste*, vale a dire quelle soluzioni che presentano in funzione del tipo di edificio e della sua localizzazione, mantengono, con maggior frequenza, un costo globale minimo al variare dei parametri climatici ed economici di incerta previsione. A tal proposito si ricorda come in quest'ottica gli scenari di cambiamento climatico e di evoluzione dei parametri economici che sono alla base dei risultati, prendono in considerazione valori “estremi” che delimitano intervalli di possibili valori futuri sufficientemente ampi da avere elevata probabilità di verificarsi.

I risultati di sintesi di questa analisi sono riportati nella Tabella 6-13. Le indicazioni che ne derivano, riferite con scopo esemplificativo agli edifici-tipo 1.3 e 2.1, possono essere applicate ad una ampia casistica di edifici in linea i cui parametri caratteristici rientrano nei corrispondenti limiti di rappresentatività riportati nella Tabella 6-14 e desunti dalle elaborazioni riportate al paragrafo 4.4.4.

Tabella 6-12 – Interventi con minor costo globale al variare dello scenario climatico ed economico di riferimento per l'edificio-tipo 1.3, orientamento S/N, zona climatica D. Le soluzioni con testo chiaro non rientrano fra quelle accettabili (+10 €/m² dal costo globale delle soluzione ottimale)

Legenda									
	Isolamento involucro avanzato, Infissi avanzati, Pompa di calore aria-aria rev.								
	Isolamento involucro avanzato, Infissi standard, Pompa di calore aria-aria rev.								
	Isolamento involucro standard, Infissi standard, Pompa di calore aria-aria rev.								
	Isolamento involucro standard, Infissi avanzati, Pompa di calore aria-aria rev.								
scenario	Soluz.ottimale		2^a soluzione		3^a soluzione		4^a soluzione		
vu80_noCC_peA_ts3	Cg = 790 €/m ²	EP = 14.9 kWh/m ²	Cg = 790 €/m ²	EP = 16.6 kWh/m ²	Cg = 801 €/m ²	EP = 18.4 kWh/m ²	Cg = 802 €/m ²	EP = 16.7 kWh/m ²	
vu80_noCC_peA_ts5	Cg = 589 €/m ²	EP = 16.6 kWh/m ²	Cg = 593 €/m ²	EP = 18.4 kWh/m ²	Cg = 594 €/m ²	EP = 14.9 kWh/m ²	Cg = 599 €/m ²	EP = 16.7 kWh/m ²	
vu80_noCC_peB_ts3	Cg = 786 €/m ²	EP = 16.6 kWh/m ²	Cg = 787 €/m ²	EP = 14.9 kWh/m ²	Cg = 798 €/m ²	EP = 18.4 kWh/m ²	Cg = 799 €/m ²	EP = 16.7 kWh/m ²	
vu80_noCC_peB_ts5	Cg = 587 €/m ²	EP = 16.6 kWh/m ²	Cg = 592 €/m ²	EP = 14.9 kWh/m ²	Cg = 592 €/m ²	EP = 18.4 kWh/m ²	Cg = 597 €/m ²	EP = 16.7 kWh/m ²	
vu80_siCC_p_eA_ts3	Cg = 823 €/m ²	EP = 19 kWh/m ²	Cg = 827 €/m ²	EP = 21.2 kWh/m ²	Cg = 834 €/m ²	EP = 20.6 kWh/m ²	Cg = 837 €/m ²	EP = 22.8 kWh/m ²	
vu80_siCC_p_eA_ts5	Cg = 604 €/m ²	EP = 21.2 kWh/m ²	Cg = 607 €/m ²	EP = 19 kWh/m ²	Cg = 607 €/m ²	EP = 22.8 kWh/m ²	Cg = 611 €/m ²	EP = 20.6 kWh/m ²	
vu80_siCC_p_eB_ts3	Cg = 819 €/m ²	EP = 19 kWh/m ²	Cg = 823 €/m ²	EP = 21.2 kWh/m ²	Cg = 830 €/m ²	EP = 20.6 kWh/m ²	Cg = 832 €/m ²	EP = 22.8 kWh/m ²	
vu80_siCC_p_eB_ts5	Cg = 602 €/m ²	EP = 21.2 kWh/m ²	Cg = 605 €/m ²	EP = 19 kWh/m ²	Cg = 605 €/m ²	EP = 22.8 kWh/m ²	Cg = 609 €/m ²	EP = 20.6 kWh/m ²	
vu50_noCC_peA_ts3	Cg = 677 €/m ²	EP = 16.6 kWh/m ²	Cg = 678 €/m ²	EP = 14.9 kWh/m ²	Cg = 687 €/m ²	EP = 18.4 kWh/m ²	Cg = 688 €/m ²	EP = 16.7 kWh/m ²	
vu50_noCC_peA_ts5	Cg = 552 €/m ²	EP = 16.6 kWh/m ²	Cg = 556 €/m ²	EP = 18.4 kWh/m ²	Cg = 557 €/m ²	EP = 14.9 kWh/m ²	Cg = 561 €/m ²	EP = 16.7 kWh/m ²	
vu50_noCC_peB_ts3	Cg = 675 €/m ²	EP = 16.6 kWh/m ²	Cg = 676 €/m ²	EP = 14.9 kWh/m ²	Cg = 685 €/m ²	EP = 18.4 kWh/m ²	Cg = 686 €/m ²	EP = 16.7 kWh/m ²	
vu50_noCC_peB_ts5	Cg = 551 €/m ²	EP = 16.6 kWh/m ²	Cg = 555 €/m ²	EP = 18.4 kWh/m ²	Cg = 556 €/m ²	EP = 14.9 kWh/m ²	Cg = 560 €/m ²	EP = 16.7 kWh/m ²	
vu50_siCC_p_eA_ts3	Cg = 692 €/m ²	EP = 16.4 kWh/m ²	Cg = 693 €/m ²	EP = 18.3 kWh/m ²	Cg = 701 €/m ²	EP = 18.1 kWh/m ²	Cg = 702 €/m ²	EP = 19.9 kWh/m ²	
vu50_siCC_p_eA_ts5	Cg = 560 €/m ²	EP = 18.3 kWh/m ²	Cg = 564 €/m ²	EP = 16.4 kWh/m ²	Cg = 564 €/m ²	EP = 19.9 kWh/m ²	Cg = 568 €/m ²	EP = 18.1 kWh/m ²	
vu50_siCC_p_eB_ts3	Cg = 690 €/m ²	EP = 16.4 kWh/m ²	Cg = 691 €/m ²	EP = 18.3 kWh/m ²	Cg = 699 €/m ²	EP = 18.1 kWh/m ²	Cg = 699 €/m ²	EP = 19.9 kWh/m ²	
vu50_siCC_p_eB_ts5	Cg = 559 €/m ²	EP = 18.3 kWh/m ²	Cg = 562 €/m ²	EP = 19.9 kWh/m ²	Cg = 563 €/m ²	EP = 16.4 kWh/m ²	Cg = 567 €/m ²	EP = 18.1 kWh/m ²	

Tabella 6-13 – Soluzioni di efficientamento più *robuste* al variare dello scenario economico e climatico (i colori evidenziano le soluzioni uguali)

Edificio e localizzazione	Interventi robusti	Frequenza
Zona climatica C Edificio 1.3 - Orientamento S/N	Isolamento involucro standard Infissi standard (doppio vetro b.e.) Pompa di calore aria-aria rev.	100%
	-	-
Zona climatica C Edificio 1.3 - Orientamento O/E	Isolamento involucro standard Infissi standard con schermatura Pompa di calore aria-aria rev.	100%
	-	-
Zona climatica C Edificio 2.1 - Orientamento S/N	Isolamento involucro avanzato Infissi standard Pompa di calore aria-aria rev.	50%
	Isolamento involucro avanzato Infissi standard con schermatura Pompa di calore aria-aria rev.	50%
Zona climatica C Edificio 2.1 - Orientamento O/E	Isolamento involucro avanzato Infissi standard con schermatura Pompa di calore aria-aria rev.	100%
	-	-
Zona climatica D Edificio 1.3 - Orientamento S/N	Isolamento involucro avanzato Infissi standard Pompa di calore aria-aria rev.	69%
	Isolamento involucro avanzato Infissi avanzato (triplo vetro b.e.) Pompa di calore aria-aria rev.	31%
Zona climatica D Edificio 1.3 Orientamento O/E	Isolamento involucro avanzato Infissi avanzato con schermatura Pompa di calore aria-aria rev.	69%
	Isolamento involucro avanzato Infissi avanzato con schermatura Pompa di calore aria-aria rev.	31%
Zona climatica D Edificio Tipo 2.1 Orientamento S/N	Isolamento involucro avanzato Infissi standard Pompa di calore aria-aria rev.	100%
	-	-
Zona climatica D Edificio 2.1 - Orientamento O/E	Isolamento involucro avanzato Infissi standard con schermatura Pompa di calore aria-aria rev.	100%
	-	-

Tabella 6-14 – Limiti di validità rappresentativa degli edifici-tipo 1.3 e 2.1

edificio-tipo	Volume lordo riscaldato – V (m³)	Sup. utile – S_u (m²)	Rapporto di forma - S/V (m⁻¹)	Rapporto S_f/S_u (-)
1.3	4000÷9100	1259÷2300	0,51÷0,42	0,143÷0,164
2.1	1200÷2700	300÷701	0,57÷0,76	0,165÷0,183

Dall'analisi dei risultati numerici della ricerca, riportati in forma completa al punto 4 degli Allegati "Risultati completi dei calcoli economici", si possono trarre le seguenti osservazioni riguardo alle diverse misure di efficienza energetica studiate:

- **Isolamento esterno dell'involucro (in abbinamento con sostituzione degli infissi e pompa di calore):**

- In zona climatica C, più mite rispetto alla zona D, il livello di isolamento termico dell'involucro termico previsto dall'attuale legislazione (DM 26/6/2015) in caso di riqualificazione energetica, risulta ottimale per gli edifici con un rapporto S/V ridotto (edificio-tipo 1.3 rappresentativo di edifici in linea con $0,42 < S/V < 0,51$), a causa delle minori dispersioni che li caratterizzano.
- In zona climatica C, per gli edifici con rapporto S/V più elevato ($0,57 < S/V < 0,76$) la soluzione economicamente più robusta è costituita da un livello di isolamento termico avanzato con trasmittanza esemplificativa delle superfici verso l'esterno pari a $0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$.
- In zona climatica D, l'intervento ottimale è costituito ancora da un isolamento termico esterno di livello avanzato, anche se, nel caso di edifici con rapporto S/V basso ($0,42 < S/V < 0,51$) il livello standard garantisce comunque un costo globale dell'intervento compreso entro i 10 €/m^2 in più rispetto alla soluzione ottimale.

- **Sostituzione degli infissi (in abbinamento con isolamento termico esterno e pompa di calore):**

- La sostituzione degli infissi originali con infissi con doppio vetro basso emissivo è la soluzione migliore in zona climatica C, indipendentemente dall'edificio-tipo e dall'orientamento.
- Per quanto riguarda la zona climatica D, nel caso dell'edificio-tipo 2.1, caratterizzato da una superficie vetrata più ampia in rapporto alla superficie utile (rapporto $S_f/S_u = 0,18$), il livello prestazionale ottimale degli infissi nuovi è quello standard previsto dalla normativa vigente (vetro doppio basso emissivo).
- Nel caso dell'edificio-tipo 1.3 caratterizzato da minore superficie vetrata (rapporto $S_f/S_u = 0,16$) e quindi da un costo d'investimento per la sostituzione degli infissi più contenuto, il vetro triplo costituisce un

intervento ottimale (69% degli scenari) solo nel caso dell'edificio orientato ad Ovest/Est, a causa del maggior fabbisogno energetico invernale di questo tipo di orientamento. Nel caso di orientamento Sud/Nord prevale il vetro doppio nel 69% degli scenari economici.

- **Schermature solari (in abbinamento a pompa di calore, isolamento termico dell'involucro e sostituzione degli infissi):**

- La convenienza economica dell'installazione delle schermature è condizionata principalmente dall'orientamento dell'edificio e secondariamente dal rapporto S_f/S_u ;
- Per edifici orientati Ovest/Est le schermature solari sono un intervento sempre ottimale sotto il profilo dei costi indipendentemente dal rapporto S/V , dall'epoca di costruzione e dalla zona climatica (C o D). Questo in ragione della maggiore quantità di apporti solari ricevuti dalle facciate così orientate durante il periodo estivo.
- In zona climatica C, per l'edificio-tipo 2.1 caratterizzato da un rapporto S_f/S_u maggiore (0,18) e rappresentativo di edifici con S_f/S_u da 0,165 a 0,183, anche nel caso di orientamento Sud/Nord, la schermatura può essere un intervento ottimale dal punto di vista economico in caso di scenario con tasso di sconto basso (3%) che premia gli interventi di efficientamento più ambiziosi.
- L'installazione delle schermature solari non è economicamente ottimale in tutti gli altri casi, tuttavia da segnalare come nel caso di edifici in linea con rapporto S_f/S_u superiore a 0,165 anche in zona climatica D, dove l'irraggiamento solare ha un ruolo meno importante come forzante climatica rispetto alla zona C, le schermature rientrano comunque fra gli interventi con più basso costo globale;
- E' da sottolineare come questi risultati si presentino indipendentemente dal fatto che si consideri un contesto climatico futuro affetto o meno dal riscaldamento globale, la cui conseguenza è l'accrescimento del peso che gli apporti solari hanno nel bilancio energetico dell'involucro rispetto agli scambi di calore per trasmissione (Pierangioli et al., 2017);

- **Impianto di climatizzazione:**

- La pompa di calore invertibile aria-aria è la soluzione ottimale in tutti i casi analizzati. La caldaia a gas tradizionale e a condensazione non rientrano in

nessun caso fra gli interventi con costo globale accettabile. Da notare come l'introduzione della pompa di calore non abbinata a nessun altro intervento, pur non essendo un intervento accettabile dal punto di vista del costo globale, presenti il rapporto fra costo di investimento iniziale e energia primaria annua per la climatizzazione risparmiata più vantaggioso (2,83 €/kWh risparmiato) di tutti gli altri interventi di riqualificazione singoli o coordinati.

In generale si deve osservare come nessuna delle misure di efficienza energetica proposte, se applicata in modo isolato, rientra negli interventi ottimali o comunque che presentano un costo globale sufficientemente basso da poter essere ritenuta accettabile. E' quindi necessario che gli interventi di efficientamento costo-ottimali prevedano l'applicazione congiunta e coordinata di diverse misure di efficienza energetica, articolate su livelli prestazionali adeguati al contesto tipologico climatico ed economico previsto.

In ragione delle corrispondenze esistenti fra la Matrice delle Tipologie Edilizia del progetto Tabula e gli edifici-tipo individuati nella presente ricerca, i risultati relativi alle soluzioni di efficientamento ottimali degli edifici tipo 1.3 e 2.1 possono essere confrontati con i corrispondenti risultati della ricerca CTI-ENEA-MSE per il calcolo dei livelli ottimali in funzione dei costi per i requisiti minimi di prestazione energetica (Ministero dello Sviluppo Economico, 2013) relativamente agli edifici "grande condominio (RGC E1)" e "piccolo condominio (RPC E1)". Il confronto è riportato nella successiva

Tabella 6-15. Per comprendere le differenze nei risultati si ricorda che la ricerca CTI-ENEA-MSE non prende in considerazione gli effetti dei possibili cambiamenti climatici, impiega codici di calcolo in regime semi-stazionario e considera un periodo di calcolo più breve, pari a 30 anni. Poiché le due ricerche trattano zone climatiche differenti, i confronti, sono stati effettuati considerando le zone climatiche contigue (C con B e D con E). Da sottolineare inoltre che per le analisi relative al clima attuale, la presente ricerca impiega profili climatici molto più recenti rispetto all'altra e che quindi già inglobano parte degli effetti dei cambiamenti climatici.

Tabella 6-15 – Confronto dei risultati con la ricerca “Applicazione della metodologia di calcolo dei livelli ottimali in funzione dei costi per i requisiti minimi di prestazione energetica”(Ministero dello Sviluppo Economico, 2013)

Edificio	Zona clim.	U_{par} W/m ² K	U_{cop} W/m ² K	U_{pav} W/m ² K	U_w W/m ² K	Scherm.	Gen. di calore
1.3 or. E-O	C	0,40	0,34	0,42	2,35	si	PdC a/a
RGC E1	B	0,42	0,35	0,49	3.2	no	C_co.+ Cond.
1.3 or. E-O	D	0,24	0,20	0,24	1,1	si	PdC a/a
RGC E1	E	0,34	0,20	0,29	1,9	no	C_co.+ Cond.
2.1 or. E-O	C	0,24	0,20	0,24	2,35	si	PdC a/a
RPC E1	B	0,48	0,3	0,36	2.6	no	C_trad.+ Cond.
2.1 or. E-O	D	0,24	0,20	0,24	2,1	si	PdC a/a
RPC E1	E	0,25	0,20	0,29	1,9	no	C_co.+ Cond.
Legenda: U_{par} : trasmittanza pareti esterne U_{cop} : trasmittanza copertura U_{pav} : trasmittanza pavimento U_w : trasmittanza infissi PdC a/a: pompa di calore aria/aria C_co: caldaia a condensazione C_trad: caldaia tradizionale Cond.: condizionatore							

Ciò premesso, per quanto riguarda i livelli di isolamento termico dell’involucro, i risultati delle due ricerche appaiono sostanzialmente allineati, ad eccezione del caso dell’edificio 2.1 in zona C che prevede valori di trasmittanza termica decisamente inferiori all’edificio “Piccolo Condominio” collocato in zona B.

Tuttavia, in considerazione delle differenze fra le zone climatiche trattate, i risultati della presente ricerca appaiono spostati verso interventi con livelli di isolamento più elevati. Rilevanti differenze si possono invece osservare, per quanto riguarda l’impiego delle schermature, che, nel caso di edifici orientati ad Ovest/Est risultano essere interventi il cui costo è giustificato dai risparmi di energia conseguibili nel futuro. Questo risultato è probabilmente dovuto al calcolo dettagliato degli effetti delle schermature effettuato dal software dinamico rispetto al software semi-stazionario (Corrado and Paduos, 2010) e all’inclusione nel calcolo di scenari di cambiamento

climatico in cui gli apporti solari hanno un peso più rilevante rispetto al clima attuale. Nella presente ricerca, inoltre, l'intervento ottimale sull'impianto di climatizzazione è costituito dalla sostituzione del complesso "caldaia tradizionale più condizionatore split" con pompe di calore aria-aria a ciclo invertibile. Nella ricerca CTI-ENEA-MSE, sembra che tale intervento non sia stato considerato, pertanto l'intervento ottimale più frequente è la "caldaia a condensazione più condizionatore split" che appare tuttavia poco realistico a causa della presenza di un doppio impianto oggi poco giustificato.

6.2.3 Valutazioni preliminari dei possibili effetti dell'utenza

L'influenza dell'utenza sulla prestazione energetica e sul comportamento termico degli edifici è un tema estremamente complesso, oggetto da molti anni di studi e ricerche in continua evoluzione, volti a definire i principi e i riferimenti metodologici per una modellazione corretta e realistica dell'interazione fra utente e meccanismi di controllo del sistema edificio-impianto. Gli studi più recenti in materia sono focalizzati sull'elaborazione di procedure e metodologie aggiornate per l'analisi dei comportamenti e la modellazione probabilistica degli stessi (D'Oca et al., 2014; Hong et al., 2016; McKenna et al., 2015).

Data l'importanza del tema, benché l'obiettivo principale della ricerca sia stato l'individuazione di una matrice tipologica su cui effettuare analisi prestazionali in diversi scenari climatici ed economici con una utenza standard, ci è parso utile mettere le premesse per una estensione della stessa finalizzata alla valutazione degli effetti del comportamento dell'utenza (Fabi, 2013; Hong et al., 2016; Pisello and Asdrubali, 2014).

In via sperimentale, al fine di analizzare in maniera preliminare e semplificata i possibili effetti sulla *robustezza* delle soluzioni di efficientamento energetico costo-ottimali individuate con la valutazione di tipo standard (*asset rating*), sono stati presi in considerazione profili di utenza non costanti nel tempo (*tailored rating*). L'adozione del profilo di utenza non standardizzato ha inciso sulla determinazione dei seguenti parametri della simulazione energetica:

- Andamento nel tempo dei livelli di occupazione, illuminazione e uso delle apparecchiature domestiche;
- Apertura manuale degli infissi per la ventilazione naturale;

- Gestione delle schermature solari.

Questi parametri incidono direttamente sulla determinazione e sull'andamento delle seguenti componenti del bilancio energetico dell'edificio:

- apporti interni gratuiti;
- apporti solari;
- dispersioni/rientrate per ventilazione.

Il profilo di utenza non standardizzato è stato rielaborato sulla base del profilo suggerito nel prospetto 14 della norma UNI/TS 11300-1 (Ente Nazionale Italiano di Unificazione - UNI, 2014a) in modo da rendere confrontabili i risultati ottenuti con quelli derivanti dalla valutazione standard.

In Tabella 6-16, sono stati associati a diversi periodi della giornata quattro possibili stati degli occupanti: presente, assente, attivo, a riposo (McKenna et al., 2015). Su questa base è stata determinata la possibilità di agire manualmente sugli infissi per incrementare la ventilazione naturale e sulle schermature per controllare gli apporti solari. In particolare, la gestione manuale della ventilazione naturale prevede che, durante i periodi di presenza e attività degli occupanti, gli infissi siano aperti quando la differenza fra temperature interna ed esterna è maggiore di 1 °C, e vengano chiusi nuovamente, per evitare un eccessivo raffrescamento, quando la temperatura interna scende al di sotto di 22 °C. Il tasso di ventilazione naturale è stato fissato a 2 h⁻¹ sulla base di valutazioni effettuate secondo la metodologia semplificata della norma UNI EN 15242:2008 ipotizzando, cautelativamente, un'apertura parziale di infissi residenziali tipologicamente e geometricamente analoghi a quelli presenti negli edifici-tipo analizzati (Ente Nazionale Italiano di Unificazione - UNI, 2008d). Limitatamente agli orari in cui gli occupanti sono presenti e attivi, la gestione della schermatura è analoga a quella impiegata per la valutazione con utenza standard. Questa impostazione permette di simulare il comportamento di un utente che attiva la schermatura all'aumentare dell'irraggiamento solare che entra negli ambienti. Negli altri periodi della giornata la schermatura è ipotizzata aperta. Coerentemente con l'impostazione generale della ricerca, è necessario sottolineare come alcune caratteristiche del profilo di utenza non standardizzato siano state definite con l'intento di riprodurre situazioni "estreme" che possano mettere in evidenza eventuali criticità nella risposta ai cambiamenti climatici delle misure di efficienza energetica più diffuse. Come si evince dalla Tabella 6-16, infatti, nei giorni lavorativi si è ipotizzato che la schermatura risulti aperta dalle 7 alle

17 a causa dell'assenza degli occupanti. Tale ipotesi permette di testare l'incertezza legata all'effettivo utilizzo della schermature che nella loro versione manuale richiedono una gestione costante e avveduta da parte dell'utente. Nello stesso modo, si è ipotizzato di consentire l'apertura delle finestre solamente durante il giorno e solo nel caso di presenza degli occupanti. Questo approccio permette di tenere conto di eventuali problematiche legate alla sicurezza e all'isolamento dal rumore esterno durante le ore notturne, che si verificano soventemente nei contesti urbani e che possono compromettere la potenziale efficacia, in termini di raffrescamento passivo, della ventilazione naturale.

Al fine di rendere i risultati di questo test confrontabili con quelli ottenuti in condizioni standardizzate si assume l'ipotesi di garantire condizioni di benessere termico costanti (sistema di climatizzazione attivabile 24 ore su 24 che mantiene la temperatura operativa interna a 20°C durante il periodo di riscaldamento e a 26°C durante il periodo di raffrescamento).

Tabella 6-16 – Schematizzazione del profilo di utenza non standardizzato

giorni lavorativi	presenza occupanti	stato occupanti	apporti interni⁵⁶ (W/m²)	schermature	Infissi (vent. naturale)
dalle 7 alle 17	assenti	attivo	2.3	aperte	chiusi
dalle 17 alle 23	presenti	attivo	5.5	gest. manuale	gest. manuale
dalle 23 alle 7	presenti	riposo	2.1	aperte	chiusi
media			3.0		
fine settimana					
dalle 8 alle 17	presenti	attivo	4.7	gest. manuale	gest. manuale
dalle 17 alle 23	presenti	attivo	6.2	gest. manuale	gest. manuale
dalle 23 alle 8	presenti	riposo	2.1	aperte	chiusi
media			4.2		

In base alla metodologia descritta, si riportano di seguito, a titolo esemplificativo, i risultati preliminari relativi all'edificio-tipo 2.1 (il più diffuso all'interno del campione analizzato) posto in zona climatica D con orientamento Sud/Nord, che dalle analisi precedenti risulta uno dei casi più critici. Sono state testate le dieci soluzioni che, con

⁵⁶ Comprendono gli apporti per presenza degli occupanti, per illuminazione artificiale e uso delle apparecchiature domestiche.

valutazione standard, presentano il migliore costo globale in rapporto alla prestazione energetica.

Analizzando il solo indice di prestazione energetica totale per la climatizzazione invernale ed estiva (Figura 6-17 e Tabella 6-17) è evidente come questo subisca un incremento che in media è del 14% per il riscaldamento e del 50% per il raffrescamento, con un incremento medio del 41% sul totale.

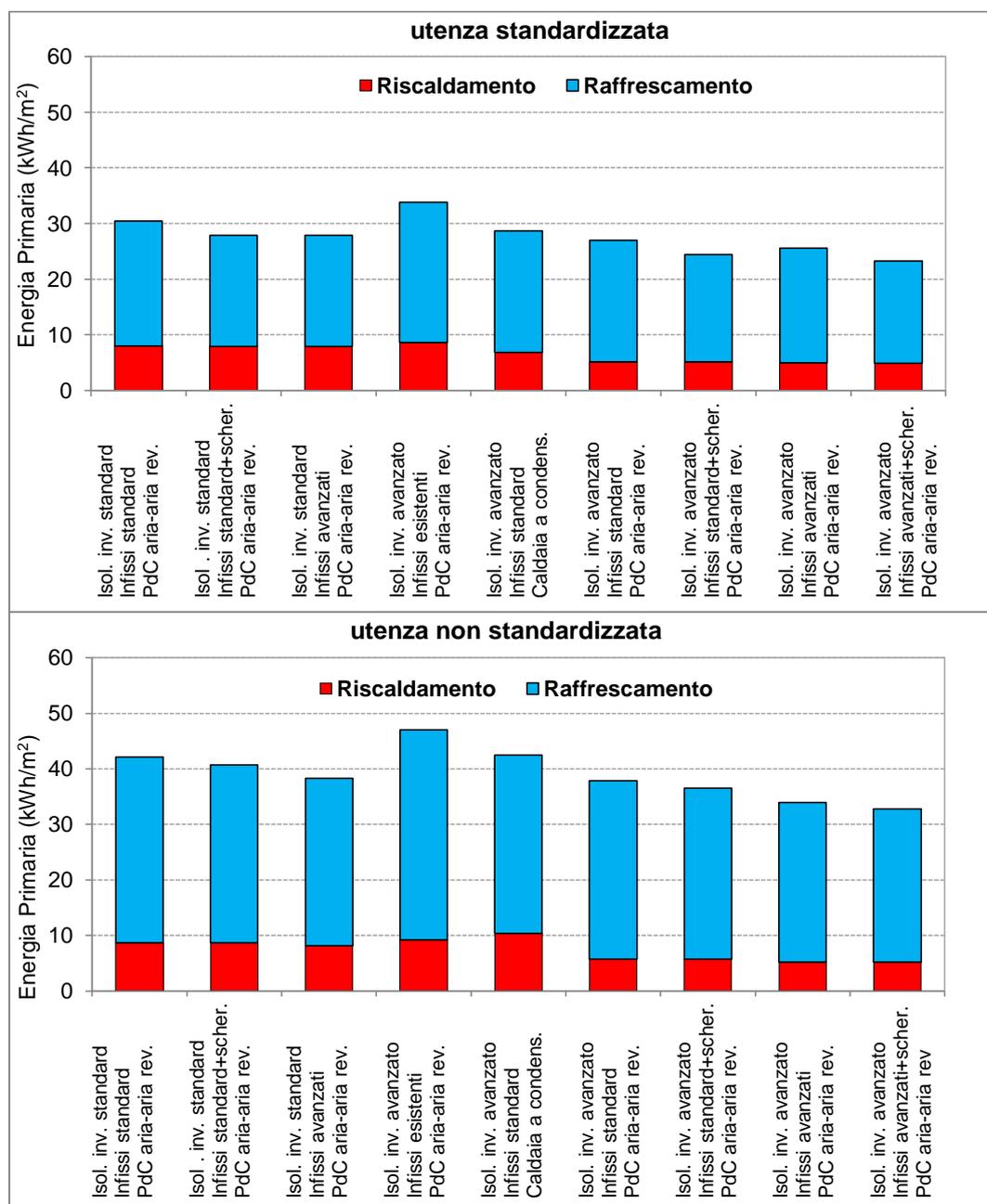


Figura 6-17 – Indice di prestazione energetica per climatizzazione invernale ed estiva (media sui tre periodi futuri) per le soluzioni che, nella valutazione in condizioni standard, garantiscono il costo globale più basso

Queste differenze sono da attribuire alla diversa gestione delle schermature solari che rimangono aperte in assenza degli occupanti causando un incremento notevole degli apporti solari. L'incremento del fabbisogno per riscaldamento è attribuibile, invece, alla diversa distribuzione oraria degli apporti interni che, a causa del periodo di riposo degli occupanti, diminuiscono nettamente nelle ore notturne quando sono maggiori le dispersioni per trasmissione attraverso l'involucro.

Tabella 6-17 – Valori assunti dall'indice di prestazione energetica per climatizzazione invernale ed estiva (media sui tre periodi futuri) per le soluzioni con costo globale più basso e relative differenza percentuali

	utenza standardizzata			utenza non standardizzata					
	Tot. (kWh/m ²)	Risc. (kWh/m ²)	Raff. (kWh/m ²)	Totale (kWh/m ²)		Risc. (kWh/m ²)		Raff. (kWh/m ²)	
Isol. inv. standard Infissi standard PdC aria-aria rev.	30.4	8.0	22.4	42.1	(+39%)	8.7	(+9%)	33.5	(+49%)
Isol. inv. standard Infissi standard + scher. PdC aria-aria rev.	27.9	7.9	20.0	40.7	(+46%)	8.7	(+9%)	32.1	(+61%)
Isol. inv. standard Infissi avanzati PdC aria-aria rev.	27.9	7.8	20.1	38.3	(+37%)	8.2	(+4%)	30.1	(+50%)
Isol. inv. avanzato Infissi esistenti PdC aria-aria rev.	33.8	8.6	25.2	47.0	(+39%)	9.2	(+7%)	37.8	(+50%)
Isol. inv. avanzato Infissi standard Caldaia a condens.	28.7	6.8	21.9	42.5	(+48%)	10.4	(+53%)	32.1	(+47%)
Isol. inv. avanzato Infissi standard PdC aria-aria rev.	27.0	5.1	21.9	37.9	(+40%)	5.8	(+13%)	32.1	(+47%)
Isol. inv. avanzato Infissi standard + scher. PdC aria-aria rev.	24.4	5.1	19.4	36.5	(+49%)	5.8	(+14%)	30.7	(+59%)
Isol. inv. avanzato Infissi avanzati PdC aria-aria rev.	25.5	4.9	20.6	34.0	(+33%)	5.3	(+7%)	28.7	(+39%)
Isol. inv. avanzato Infissi avanzati + scher. PdC aria-aria rev.	23.3	4.9	18.4	32.8	(+41%)	5.3	(+7%)	27.6	(+50%)

Osservando le differenze a livello di singoli periodi futuri (Figura 6-18) si nota come, per le stesse motivazioni, la riduzione del fabbisogno di riscaldamento e l'incremento

per il raffrescamento siano in media più accentuati nei risultati ottenuti a seguito di una valutazione con utenza non standard (incremento del fabbisogno sul lungo termine aumenta rispetto al clima attuale del 59% invece che del 42%).

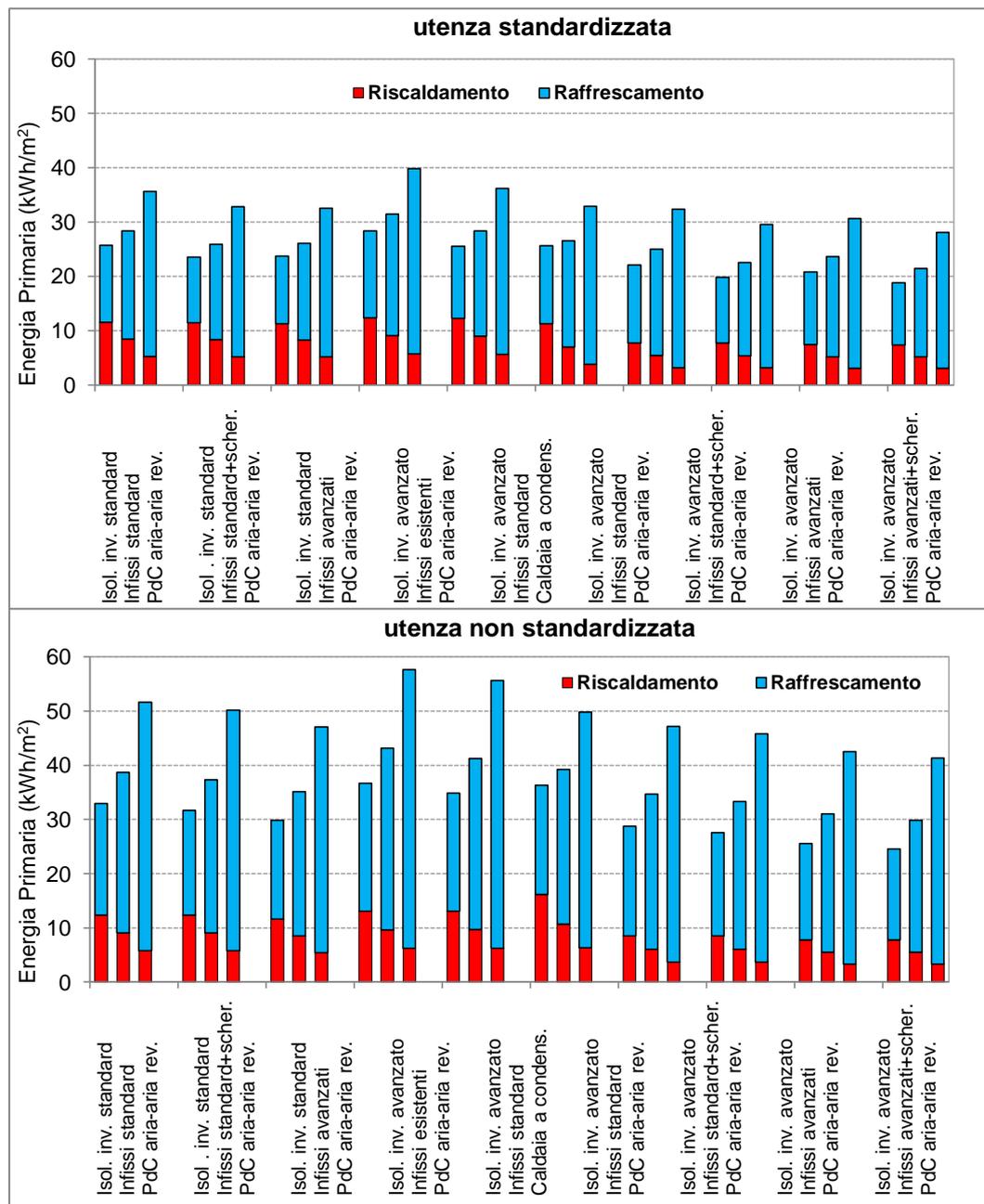


Figura 6-18 - Indice di prestazione energetica per climatizzazione invernale ed estiva nei tre periodi futuri per le soluzioni che, nella valutazione in condizioni standard, garantiscono il costo globale più basso.

Le differenze in termini di prestazione energetica fra i due tipi di valutazione si riflettono sulla determinazione del costo globale delle soluzioni prese in considerazione.

Nella Figura 6-19 sono rappresentati i grafici “Costo Globale/Indice di Prestazione Energetica delle 10 soluzioni suddette con utenza standardizzata e non, in rapporto ad un scenario economico con tasso di sconto basso (3%), un elevato incremento dei costi energetici e vita utile estesa che risulta favorevole agli interventi di riqualificazione più performanti e caratterizzati da un maggiore costo d’investimento iniziale. Nella Figura 6-20 gli stessi grafici con condizioni economiche al contorno che prevedono un tasso di sconto al 5%, un basso incremento dei prezzi energetici e una vita utile dell’edificio pari a 50 anni.

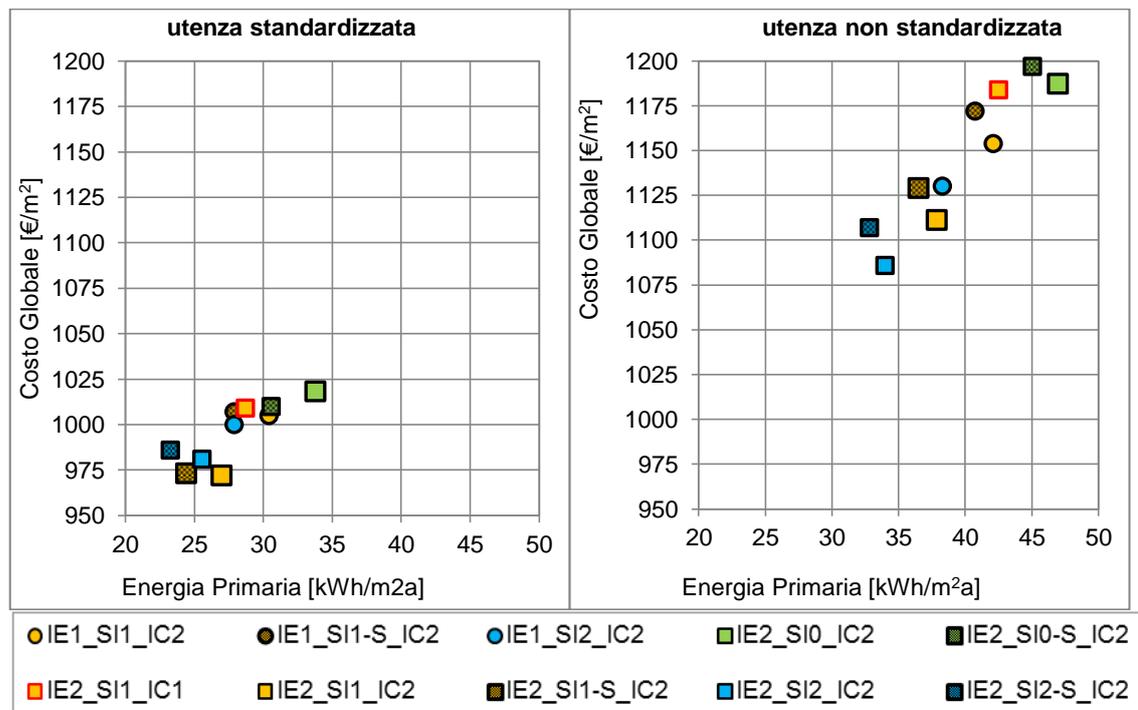


Figura 6-19 – Grafico “Costo Globale/Indice di Prestazione Energetica” delle 10 soluzioni con minore costo globale. Scenario climatico-economico di riferimento: vu80_siCC_peA_ts3

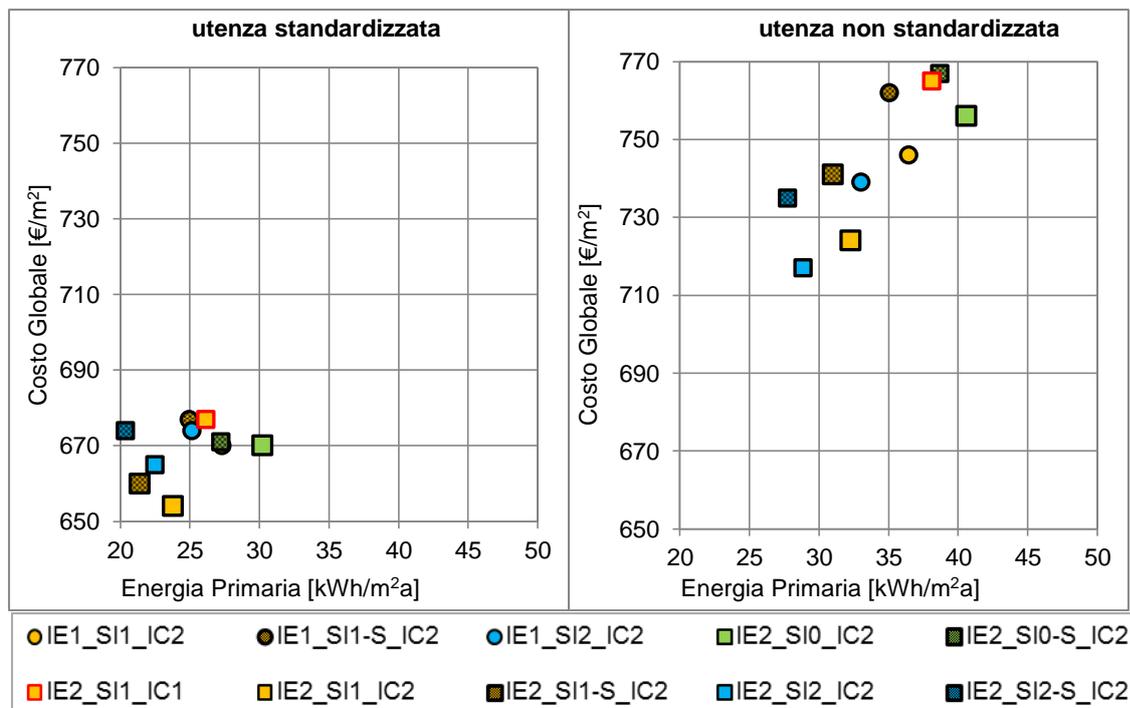


Figura 6-20 – Grafico “Costo Globale/Indice di Prestazione Energetica” delle 10 soluzioni con minore costo globale. Scenario climatico-economico di riferimento: vu50_siCC_peB_ts5

L’analisi dei grafici permette di fare le seguenti osservazioni:

- In generale i maggiori fabbisogni energetici derivanti dall’utenza non standard, producono un incremento del costo globale delle soluzioni e un conseguente cambiamento nella determinazione della soluzione costo-ottimale a parità di scenario;
- Indipendentemente dallo scenario economico selezionato l’effetto della valutazione adattata all’utenza determina un cambiamento della soluzione ottimale e nell’ordine delle migliori soluzioni. Mentre la soluzione ottimale con utenza standardizzata prevede l’isolamento avanzato dell’involucro, infissi standard a norma di legge (doppio vetro) e la pompa di calore aria-aria, nella valutazione con utenza non standard la soluzione con costo globale più basso prevede l’isolamento avanzato dell’involucro, infissi avanzati (triplo vetro) e la pompa di calore aria-aria;
- In generale nella valutazione con utenza non standard tutte le soluzioni con infissi di livello avanzato migliorano la propria prestazione in termini di costo globale, mentre gli infissi di base la peggiorano;
- Le misure di efficientamento che prevedono schermature peggiorano la propria prestazione in rapporto alla soluzione analoga ma priva delle schermature;

- Rispetto all'entità delle variazioni apportate alla prestazione energetica dalla diversa gestione del controllo degli apporti solari, l'incremento della ventilazione non sembra apportare benefici altrettanto evidenti. D'altra parte le analisi preliminari effettuate nel contesto di questa ricerca (Pierangioli et al., 2017) avevano evidenziato come questo tipo di misura seppur efficace nelle condizioni climatiche attuali, tendesse a perdere rapidamente efficacia nel medio e lungo termine a causa del riscaldamento dell'aria ambiente.

Le osservazioni sopra elencate sono interpretabili facendo riferimento al profilo di utenza ipotizzato che prevede la mancata chiusura delle veneziane esterne durante le ore centrali dei giorni lavorativi a causa dell'assenza di occupanti. Il mancato, o comunque non garantito, utilizzo della veneziana determina una netta diminuzione dell'efficacia di questo dispositivo di schermatura a fronte di costi d'investimento, manutenzione e sostituzione, che rimangono invariati, rendendolo di fatto una soluzione antieconomica. All'opposto i vetri tripli che assumono, in combinazione con isolamento esterno avanzato e pompa di calore, il ruolo di soluzione ottimale, vengono premiati non tanto in ragione della loro ridotta trasmittanza termica, quanto piuttosto del loro ridotto fattore solare. Questi, infatti, in assenza della possibilità di utilizzare sufficientemente la veneziana e in ragione del basso fattore solare assumono il ruolo di dispositivo fisso di controllo della radiazione solare che non risente dello stato di presenza/assenza attività/riposo dell'utente.

Estendendo il calcolo a tutti gli scenari di cambiamento climatico ed economici ipotizzati è possibile verificare la robustezza degli interventi ottimali individuati. L'analisi, i cui risultati sono riassunti nella Tabella 6-18 conferma le osservazioni precedenti.

Tabella 6-18 – Soluzioni più robuste con utenza standardizzata e realistica (edificio-tipo 2.1, posto in zona climatica D, con orientamento Sud)

Utenza	Soluzione ottimale	Soluzioni accettabili (entro 10€/m² dal costo globale ottimale)	
standard	-Isolamento involucro avanzato -Infissi standard -Pompa di calore (IE2_SI1_IC2)	-Isolamento involucro avanzato -Infissi standard con schermatura -Pompa di calore (IE2_SI1-S_IC2)	-Isolamento involucro avanzato -Infissi avanzati -Pompa di calore (IE2_SI2_IC2)
non standard	-Isolamento involucro avanzato -Infissi avanzati -Pompa di calore (IE2_SI2_IC2)	-Isolamento involucro avanzato -Infissi standard -Pompa di calore (IE2_SI1_IC2)	-

Pur con tutte le cautele dovute alla limitatezza dell'analisi, è possibile concludere che, a fronte delle incertezze legate agli effetti del comportamento dell'utenza sulla gestione dei dispositivi di controllo degli apporti solari, risultano più *robuste* le soluzioni, quali le schermature fisse (aggetti orizzontali, frangisole, etc.) o le veneziane dotate di controllo automatico, che permettono di regolare i suddetti apporti anche in assenza degli occupanti. Queste osservazioni che sono particolarmente importanti in ragione della sempre maggiore importanza che la radiazione solare assume negli scenari futuri come forzante del bilancio energetico dell'edificio, sono a maggior ragione estendibili anche agli orientamenti Est/Ovest che, dalle analisi precedenti, erano risultati ancor più sensibili all'irraggiamento solare. La maggiore efficacia, rispetto ai sistemi manuali, delle schermature dotate di controlli automatici dell'apertura e dell'inclinazione delle lamelle è stata per altro valutata e documentata mediante analisi numeriche e misure sperimentali svolte durante la stesura della presente ricerca (Carletti et al., 2014; Sciarpi et al., 2015; Carletti et al., 2016; Secchi et al., 2016)⁵⁷. Tali sistemi riescono, infatti a regolare in maniera dinamica e adattiva il flusso radiativo entrante attraverso gli infissi indipendentemente dalla presenza degli utenti nell'edificio. In conclusione l'analisi

⁵⁷ I risultati di queste ricerche sono stati pubblicati su riviste scientifiche internazionali in forma di articoli dei quali il Dottorando è co-autore.

preliminare degli effetti dell'utenza non standard ha evidenziato l'utilità di poter estendere in futuro la ricerca anche ad un approfondimento di questi aspetti.

6.3 Data-Base dei risultati e gestione mediante foglio elettronico

Il foglio di calcolo sviluppato nella presente tesi, ha lo scopo di sistematizzare i risultati della ricerca rendendoli facilmente fruibili dai potenziali destinatari della stessa. Il suo scopo è permettere di individuare, a partire dalla Matrice Tipologica, le soluzioni di riqualificazione energetica e i limiti prestazionali che garantiscono un rapporto ottimale fra costi e prestazioni energetiche, evidenziando quelle soluzioni, definite *robuste*, che mantengono inalterata la propria prestazione, al variare degli scenari climatici ed economici futuri presi in considerazione come principali fattori di incertezza.

Il foglio di calcolo, sviluppato in versione preliminare, riporta al momento i risultati dei due edifici-tipo esemplificativi analizzati (edificio-tipo 1.3 e 2.1). Al fine di mantenere la sua utilità nel tempo è, tuttavia implementabile con altre tipologie edilizie, con ulteriori categorie di intervento, con aggiornamenti degli scenari climatici ed economici.

Il foglio di calcolo è articolato nelle seguenti fasi di input e output:

- Input:
 1. Selezione dell'edificio-tipo di riferimento dalla Matrice delle Tipologie Edilizie, in funzione della dimensione edilizia (Volume Lordo Riscaldato o numero di appartamenti) e dell'epoca di costruzione che caratterizzano l'edificio reale oggetto di studio. La selezione si basa sugli intervalli di applicabilità degli edifici-tipo in rapporto ai parametri rapporto S/V, rapporto S_f/S_u e Superficie Utile, definiti al paragrafo 4.4.4;
 2. Selezione della zona climatica (C o D) e dell'orientamento delle facciate principali (Nord/Sud o Ovest/Est);
 3. Eventuale input dei valori di costo e vita utile degli interventi di riqualificazione proposti che differiscono da quelli impostati di default e descritti al paragrafo 5.2;
 4. Eventuale input dei valori di costo iniziale dell'energia diversi da quelli proposti di default e riportati nel paragrafo 3.3.1.
- Output:

1. Elaborazione automatica della classifica degli interventi di riqualificazione (da quello ottimale a quello peggiore) sulla base dei valori assunti del costo globale sul ciclo vita e dall'indice di prestazione energetica per la climatizzazione invernale ed estiva al variare degli scenari climatici ed economici ipotizzati. In analogia metodologica con quanto illustrato al paragrafo 6.2.2, gli interventi saranno raggruppati in fasce di opportunità economica in base agli incrementi del costo globale massimo accettabile ($\text{€}/\text{m}^2$) rispetto al valore ottimale.
2. Individuazione dell'indice di robustezza di ciascun intervento in base alla frequenza con cui rappresenta la soluzione ottimale al variare degli scenari climatici ed economici ipotizzati;
3. Il foglio di calcolo permette, infine, una volta selezionato uno scenario di riferimento, di visualizzare il grafico a dispersione "Costo Globale / Indice di Prestazione Energetica" e il grafico a barre relativo all'evoluzione dell'indice di prestazione energetica nei tre orizzonti temporali considerati degli interventi di riqualificazione proposti.

Nella Figura 6-21, nella Figura 6-22, nella Figura 6-23 e nella Figura 6-24 sono riportate alcune schermate dello strumento di consultazione.

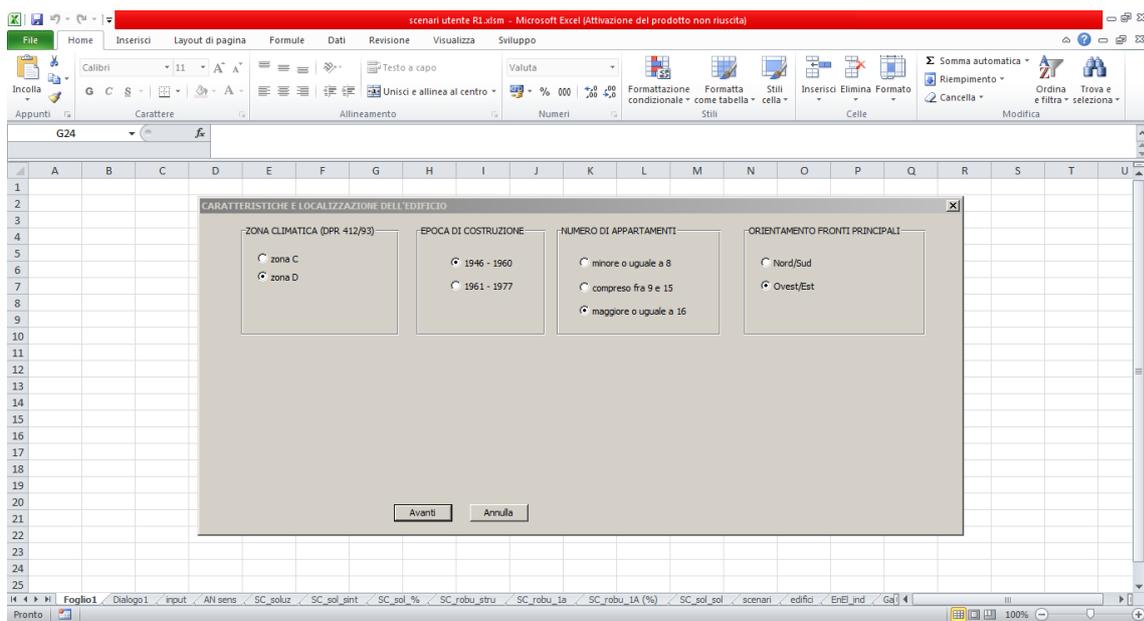


Figura 6-21 – Schermata di input dello strumento

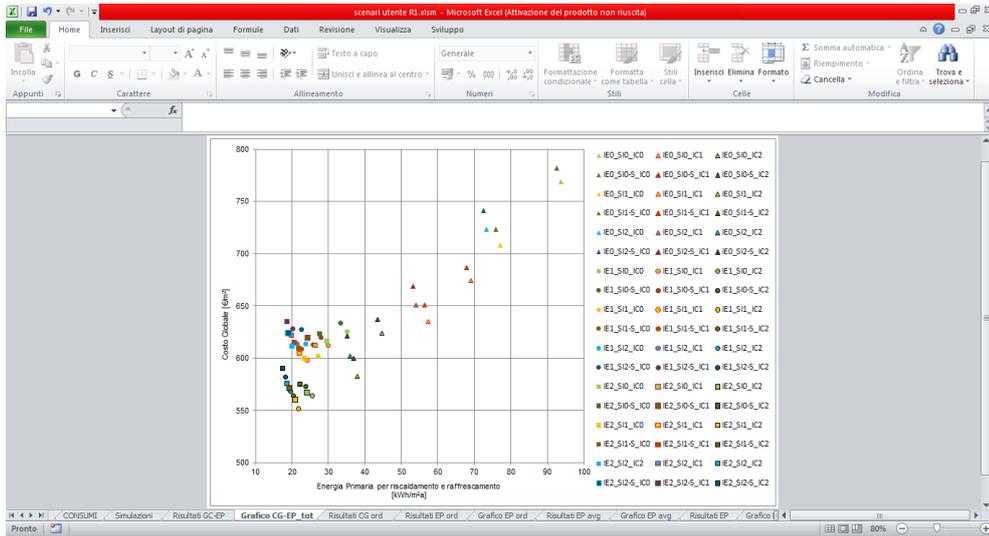


Figura 6-22 – Output dello strumento: grafico “Costo Globale / Prestazione Energetica” delle soluzioni di efficientamento

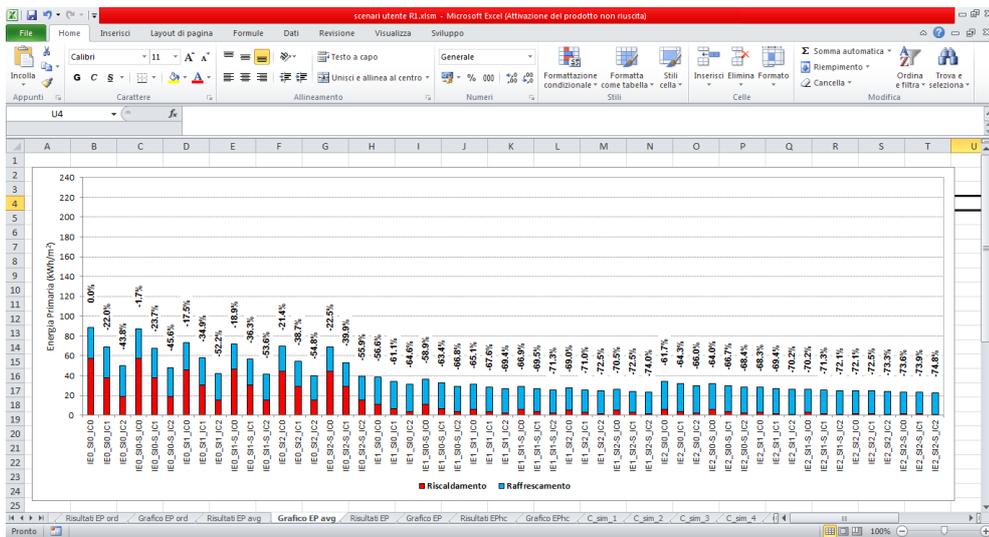


Figura 6-23 - Output dello strumento: grafico della prestazione energetica delle soluzioni di efficientamento

Figura 6-24 - Output dello strumento: suddivisione delle soluzioni di riqualificazione in fasce di opportunità economica.

7 Conclusioni e riepilogo del contributo della ricerca nel contesto nazionale e internazionale

La ricerca ha affrontato il tema degli effetti dei cambiamenti climatici sulle prestazioni termo-energetiche degli edifici collocati nelle zone climatiche C e D (clima mediterraneo) e ha analizzato il loro impatto sulla riqualificazione energetica dei patrimoni edilizi residenziali costruiti precedentemente all'entrata in vigore della Legge 373/76, che *pesano* maggiormente nel bilancio energetico complessivo. Dai risultati della prima parte della ricerca, che concordano con le conclusioni dei principi contribuiti internazionali sul tema, emerge come, in questo contesto climatico, a fronte del prevedibile incremento delle temperature, gli edifici civili esistenti è probabile che vedano un rilevante aumento dei propri consumi di energia primaria per la climatizzazione (Asimakopoulos et al., 2012; Berger et al., 2014, 2014, van Hooff et al., 2016, 2015). Sul lungo periodo il fabbisogno per raffrescamento potrebbe crescere fino ad oltre il 200% uguagliando o in molti casi superando il corrispondente fabbisogno per riscaldamento. Se negli edifici non riqualificati e non isolati, con consumi prevalentemente invernali, la combinazione di questi effetti produce una riduzione nel tempo dei fabbisogni energetici complessivi, che tuttavia rimangono elevatissimi in valore assoluto, la situazione muta radicalmente quando si applicano le necessarie misure di efficientamento energetico o si interviene su edifici più recenti. In questo caso, in particolare con l'isolamento termico dell'involucro e l'introduzione di generatori di calore ad elevato rendimento (caldaie a condensazione e pompe di calore), se da un parte si assiste ad una riduzione molto importante dell'attuale fabbisogno energetico complessivo, dall'altra si può osservare come queste misure agendo prevalentemente sui consumi invernali, ridurranno progressivamente la propria efficacia a fronte dei previsti cambiamenti climatici. Sul medio e lungo periodo, infatti, a causa del riscaldamento globale, i consumi invernali avranno un peso progressivamente decrescente rispetto a quelli estivi.

In sintesi, per quanto riguarda l'efficacia delle misure passive di efficientamento energetico nell'affrontare i cambiamenti climatici, i risultati della ricerca mostrano che negli edifici esistenti non isolati la priorità è costituita dall'isolamento termico dell'involucro, mentre negli edifici attuali già isolati è richiesto primariamente il controllo degli apporti solari.

Da queste considerazioni, già avvallate da altre ricerche, emerge la necessità di valutare mediante strumenti adeguati, gli interventi di efficientamento energetico dei patrimoni edilizi esistenti prendendo in considerazione anche gli effetti dei cambiamenti climatici sulle diverse tipologie edilizie, epoche di costruzione e contesti climatici e microclimatici (McLeod et al., 2013b; Robert and Kummert, 2012).

I risultati, che danno evidenza numerica alle suddette affermazioni, sono la premessa dell'obiettivo di valutare le misure di efficientamento energetico incentivate e più diffuse sul territorio nazionale, al fine di individuare quelle in grado di garantire prestazioni energetiche ottimali in funzione dei costi.. Alla luce della prospettiva di lungo termine adottata, la valutazione ha considerato diversi possibili scenari di evoluzione dei parametri climatici (intensità del cambiamento climatico) e dei fattori tecnico-economici (vita utile, tasso di sconto, prezzo dei vettori energetici) al fine di individuare le soluzioni più *robuste* ovvero che mantengono una validità apprezzabile nel tempo a fronte dei fattori di incertezza ipotizzati, e che quindi meglio si adattano agli stessi.

Il riferimento adottato è costituito dalla metodologia condivisa e sviluppata a livello europeo (*Direttiva 2010/31/UE*, 2010, *Regolamento UE 244/2012*, 2012; Commissione Europea, 2012) per la determinazione dei livelli ottimali di prestazione energetica degli edifici. Tale metodologia è stata implementata in Italia, mediante una ricerca congiunta CTI, ENEA e RSE, finalizzata alla definizione dei requisiti minimi di prestazione energetica per gli edifici nuovi e soggetti a riqualificazione energetica del DM 26/6/2015. In rapporto al suddetto lavoro, la presente tesi ha proposto le seguenti implementazioni al fine di soddisfare gli obiettivi preposti:

- Condizioni al contorno climatiche condizionate dagli effetti del riscaldamento globale;
- Allargamento dell'analisi tipologica del patrimonio edilizio esistente al fine di incrementare la rappresentatività degli edifici campione;
- Simulazione della prestazione energetica con codici di calcolo in regime dinamico al fine di valutare più accuratamente gli effetti dell'inerzia termica e dell'irraggiamento solare di particolare importanza in ambito mediterraneo.

In merito al primo punto, sono stati elaborati, sulla base degli archivi climatici ufficiali CTI, profili climatici orari per le zone C e D, rappresentativi delle possibili condizioni future. La metodologia adottata, basata sui dati aggiornati (IPCC AR5) derivanti da

modelli climatici ad alta risoluzione appositamente sviluppati per il complesso contesto geografico italiano, potrà essere estesa ad altre realtà climatiche fino a costituire un archivio nazionale assimilabile a quelli prodotti nell'ambito di altre ricerche europee sul tema (Jentsch, 2012; Jentsch et al., 2013, 2008).

In merito al secondo punto, la ricerca, adottando la medesima metodologia di generazione, ha contribuito ad allargare la matrice delle tipologie edilizie italiane sviluppata nei progetti europei TABULA ed EPISCOPE, precedentemente impiegata per la costituzione dei modelli edificio-impianto analizzati per la definizione dei requisiti minimi di legge. Il patrimonio di riferimento è stato quindi esteso a edifici rappresentativi dell'edilizia residenziale multifamiliare in linea, caratteristici delle zone climatiche C e D, costruiti nell'ambito dei piani INA-CASA e GESCAL. L'importanza del campione scelto è determinata dall'influenza che gli edifici realizzati nell'ambito dei suddetti piani hanno avuto nel definire l'identità tipologica e distributiva dell'edilizia residenziale italiana del dopoguerra. Tale influenza è inoltre validata dai dati ISTAT che confermano la significatività del campione scelto: il 52% delle abitazioni italiane è stato costruito nel periodo 1946-1980 e il 63% di queste è collocato in edifici plurifamiliari (con 3 o più unità immobiliari).

Dall'analisi dei più diffusi interventi di riqualificazione energetica, condotta adottando le suddette implementazioni metodologiche, emergono le seguenti indicazioni che, pur a prescindere dalla possibilità di generalizzazione, sono utili per evidenziare alcune tendenze dell'efficacia delle misure di adattamento al cambiamento climatico in clima mediterraneo.

Al variare delle caratteristiche tipologiche e tecnologiche dell'edificio e al variare degli scenari economici e climatici che si ipotizza possano realizzarsi, le differenze, in termini di prestazione energetica e ritorno economico dell'investimento, fra i diversi interventi di riqualificazione possono essere molto significative e comunque tali da rendere necessaria un'accurata valutazione tesa ad evitare soluzioni di efficientamento non ottimali e poco *robuste*.

In generale al fine di garantire sul lungo periodo gli obiettivi di adattamento ai cambiamenti climatici e di convenienza economica, le strategie di intervento da mettere in atto devono prevedere l'applicazione congiunta e coordinata di più misure di efficienza energetica diverse, articolate su livelli prestazionali adeguati al particolare contesto climatico ed edilizio nel quale si interviene.

L'isolamento termico dell'involucro ha un ruolo estremamente complesso in quanto sul breve periodo, a fronte di un aumento moderato delle temperature esterne, deve garantire un compromesso fra l'isolamento termico invernale e la possibilità di disperdere il calore accumulato in estate, mentre sul lungo periodo risulta efficace anche nel contrastare le rientrate di calore per trasmissione dall'esterno che assumono un ruolo rilevante nel bilancio termico dell'edificio (Pierangioli et al., 2017). I livelli di isolamento termico previsti dall'attuale legislazione (DM 26/06/2015), considerando gli effetti dei cambiamenti climatici sul comportamento dell'involucro, risultano costo-ottimali solo in zona climatica C per edifici con rapporto S/V ridotto ($S/V < 0,51$); negli altri casi, sotto le ipotesi assunte a base della presente ricerca, è opportuno raggiungere livelli di isolamento che vadano oltre i limiti di riferimento per gli edifici ad energia quasi zero;

Le schermature solari, se opportunamente selezionate in funzione dell'orientamento dell'infisso, sono una misura generalmente efficace dal punto di vista economico e uno dei pochi interventi che a fronte dell'aumento delle temperature connesso ai cambiamenti climatici, vede aumentare la propria efficacia nel tempo. L'importanza di tale intervento è stata sancita anche dal DM 26/06/2015 che li rende di fatto obbligatori per le esposizioni diverse dal Nord;

Per quanto riguarda la sostituzione degli infissi i limiti attuali di trasmittanza individuati dalla vigente legislazione (DM 26/6/2015) risultano un limite costo-ottimale oltre il quale non conviene spingere i futuri aggiornamenti legislativi. In generale il vetro triplo (U_w pari a $1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$) non risulta una soluzione giustificata dal punto di vista economico eccetto che in alcuni casi particolari.

Dal punto di vista impiantistico la pompa di calore aria-aria in configurazione multi-split, con efficienze (COP e EER) pari a quelle previste dall'attuale decreto sui requisiti minimi (DM 26/06/2015), impiegata come unico generatore per la climatizzazione invernale ed estiva, garantisce prestazioni energetiche ed economiche del sistema edificio-impianto significativamente superiori rispetto al complesso caldaia a condensazione più condizionatore multi-split.

Gli effetti del cambiamento climatico sul lungo periodo (fino al 2095) analizzati mediante codici di calcolo in regime dinamico, sembrano favorire soluzioni di riqualificazione caratterizzate da livelli prestazionali più spinti rispetto a valutazioni analoghe con orizzonte temporale più limitato e che non prendono in considerazione gli

impatti, futuri e già in atto, del riscaldamento globale. In ogni caso gli effetti dei cambiamenti climatici che sono di notevole entità se si limita l'analisi alla sola prestazione energetica, determinano effetti molto più ridotti se l'analisi viene estesa all'efficacia economica (costo globale) degli interventi.

Infine, pur nella limitatezza del caso analizzato, i risultati della ricerca hanno evidenziato che l'efficacia delle soluzioni costo-ottimali può essere fortemente condizionata dal comportamento degli occupanti. In particolare possono risultare poco *robuste* quelle soluzioni che, necessitando dell'intervento degli utenti per essere attuate (ventilazione naturale, schermature manuali), risentono dell'incertezza legata all'effettivo comportamento degli stessi. Tali risultati preliminari avvalorano l'intenzione di proseguire l'analisi di questi aspetti.

In conclusione tutti gli aspetti analizzati, estesi agli altri edifici-tipo della matrice o ad altri contesti tipologici e scenari climatici ed economici, possono avere ricadute interessanti per la revisione di aspetti normativi (ad esempio i requisiti minimi di prestazione dell'involucro e degli impianti da DM 26/09/2015), anche legati all'incentivazione fiscale degli interventi di efficientamento, e per indirizzare efficacemente le scelte riguardanti la progettazione e l'efficientamento energetico del patrimonio edilizio residenziale esistente. Ciò consente di adottare una politica di normazione energetica basata su una strategia di lungo periodo che prenda in considerazione anche l'adattamento ai cambiamenti climatici tra altre possibili variabili. Trascurare del tutto tali aspetti, può, infatti, portare ad una errata valutazione dei risultati attesi e perfino all'incentivazione e promozione di soluzioni potenzialmente controproducenti.

Bibliografia

- Acocella, A., 1980. L'edilizia residenziale pubblica in Italia dal 1945 ad oggi, Problemi e tendenze dell'architettura contemporanea. CEDAM, Padova.
- Almeida, M., Bencresciuto, A., Ferreira, M., Rodrigues, A., 2015. Cost-effective Energy and Carbon Emission Optimization in Building Renovation – A Case-Study in a Low Income Neighbourhood. *Energy Procedia*, 6th International Building Physics Conference, IBPC 2015 78, 2403–2408. doi:10.1016/j.egypro.2015.11.203
- Almeida, M., Ferreira, M., 2015. IEA EBC Annex56 Vision for Cost Effective Energy and Carbon Emissions Optimization in Building Renovation. *Energy Procedia*, 6th International Building Physics Conference, IBPC 2015 78, 2409–2414. doi:10.1016/j.egypro.2015.11.206
- ANIT, 2016. GUIDA ANIT NAZIONALE Regole per l'efficienza energetica degli edifici.
- Arambula Lara, R., Pernigotto, G., Cappelletti, F., Romagnoni, P., Gasparella, A., 2015. Energy audit of schools by means of cluster analysis. *Energy Build.*, Special Issue: Historic, historical and existing buildings: designing the retrofit. An overview from energy performances to indoor air quality 95, 160–171. doi:10.1016/j.enbuild.2015.03.036
- Ascione, F., de Rossi, F., Vanoli, G.P., 2011. Energy retrofit of historical buildings: theoretical and experimental investigations for the modelling of reliable performance scenarios. *Energy Build.* 43, 1925–1936. doi:10.1016/j.enbuild.2011.03.040
- Asdrubali, F., Baldassarri, C., Fthenakis, V., 2013. Life cycle analysis in the construction sector: Guiding the optimization of conventional Italian buildings. *Energy Build.* 64, 73–89. doi:10.1016/j.enbuild.2013.04.018
- Asdrubali, F., Baldinelli, G., Bianchi, F., Sciarpi, F., Carletti, C., 2009. Comparison between dynamic and stationary simulation codes for energy evaluation of buildings, in: *Atti Del 47° Congresso Internazionale AICARR*. Tivoli, Roma, Italia, pp. 269–280.
- Asdrubali, F., Beccali, G., Cellura, M., Cumo, F., Matteo, U.D., Gugliermetti, F. (Eds.), 2012. L'analisi di ciclo di vita degli edifici: metodi, strumenti, casi di studio. Celid, Torino.
- Asimakopoulos, D.A., Santamouris, M., Farrou, I., Laskari, M., Saliari, M., Zanis, G., Giannakidis, G., Tigas, K., Kapsomenakis, J., Douvis, C., Zerefos, S.C., Antonakaki, T., Giannakopoulos, C., 2012. Modelling the energy demand projection of the building sector in Greece in the 21st century. *Energy Build.* 49, 488–498. doi:10.1016/j.enbuild.2012.02.043

- Autorità per l'energia elettrica, il gas ed il servizio idrico - AEEGSI, 2016. Relazione annuale sullo stato dei servizi e sull'attività svolta. Volume I Stato dei servizi.
- Ballarini, I., Capozzoli, A., Corrado, V., 2010. A validation of the quasi-steady state building energy model by a dynamic numerical analysis, in: Atti Del 10° Convegno Mondiale REHVA "Sustainable Energy Use in Buildings" (CLIMA 2010). Antalya, Turchia.
- Bardelli, P.G., Capomolla, R., Vittorini, R., 2003. L'architettura INA casa (1949-1963): aspetti e problemi di conservazione e recupero, Architettura e costruzione 2. Gangemi, Roma.
- Belcher, S.E., Hacker, J.N., Powell, D.S., 2005. Constructing design weather data for future climates. *Build. Serv. Eng. Res. Technol.* 26, 49–61.
doi:10.1191/0143624405bt112oa
- Beneforti, G., Ottanelli, A., 2012. Le case popolari di Pistoia. Vannini, Buggiano.
- Berger, T., Amann, C., Formayer, H., Korjenic, A., Pospichal, B., Neururer, C., Smutny, R., 2014. Impacts of urban location and climate change upon energy demand of office buildings in Vienna, Austria. *Build. Environ.* 81, 258–269.
doi:10.1016/j.buildenv.2014.07.007
- Bernstein, A.G., Piccarreta, A., 1978. Appalti e Concorsi regionali di prequalificazione per componenti e progetti tipo. Consorzio Regionale I.A.C.P. Lombardia. Prefabbricare Edil. Evol. 66–201.
- Birchall, S., Wallis, I., Churcher, D., Pezzutto, S., Fedrizzi, R., Causse, E., 2014. Development of Systemic Packages for Deep Energy Renovation of Residential and Tertiary Buildings including Envelope and Systems. D2.1a Survey on the energy needs and architectural features of the EU building stock.
- Bucchignani, E., Montesarchio, M., Zollo, A.L., Mercogliano, P., 2016. High-resolution climate simulations with COSMO-CLM over Italy: performance evaluation and climate projections for the 21st century. *Int. J. Climatol.* 36, 735–756.
doi:10.1002/joc.4379
- Busato, F., 2014. Analisi economica. Fondamenti e applicazioni al sistema edificio-impianto, Collana Tecnica AiCARR. Editoriale Delfino, Milano.
- Caldera, M., Corgnati, S.P., Filippi, M., 2008. Energy demand for space heating through a statistical approach: application to residential buildings. *Energy Build.* 40, 1972–1983. doi:10.1016/j.enbuild.2008.05.005
- Camera di Commercio di Firenze, 2015. Prezzario delle opere edili ed impiantistiche.
- Capros, P., Mantzos, L., Tasios, N., De Vita, A., Kouvaritakis, N., 2010. EU energy trends to 2030.
- Carletti, C., Cellai, G., Sciarpi, F., Pierangioli, L., 2015. Effetti dei cambiamenti climatici sulle prestazioni termo-energetiche degli edifici in clima Mediterraneo, in: Atti Del 15° Congresso Nazionale CIRIAF.

- Carletti, C., Scurpi, F., Pierangioli, L., 2014. The energy upgrading of existing buildings: Window and shading device typologies for energy efficiency refurbishment. *Sustain. Switz.* 6, 5354–5377. doi:10.3390/su6085354
- Carletti, C., Scurpi, F., Pierangioli, L., Asdrubali, F., Pisello, A.L., Bianchi, F., Sambuco, S., Guattari, C., 2016. Thermal and lighting effects of an external venetian blind: Experimental analysis in a full scale test room. *Build. Environ.* 106, 45–56. doi:10.1016/j.buildenv.2016.06.017
- Cellai, G.F., Geri, A., Mondì, B., 2003. La certificazione energetica di edifici residenziali. Una procedura alternativa per il calcolo del rendimento. *CDA* 10.
- Centro ricerche economiche, sociologiche e di mercato nell'edilizia, 1971. Come si costruisce in Italia: principali risultati di una ricerca di mercato nel settore dei materiali e impianti per l'edilizia. s.n., S.I.
- Centro ricerche economiche, sociologiche e di mercato nell'edilizia, 1966. Indagine sui fabbricati residenziali in Italia. A. Giuffrè, Milano.
- Centro ricerche economiche, sociologiche e di mercato nell'edilizia - CRESME, 2012. Città, mercato e rigenerazione 2012. Analisi di contesto per una nuova politica urbana.
- Chiesa, B., 1964. Indagine sulla produzione edilizia in Italia. Giuffrè, Milano.
- Christensen, J.H., Hewitson, B., Busuioc, A., Gao, X., Held, I., Jones, R., Kolli, R.K., Kwon, W.-T., Laprise, R., Magaña Rueda, V., Mearns, L., Menéndez, G.C., Räisänen, J., Rinke, A., Sarr, A., Whetton, P., 2007. Regional Climate Projections, in: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L. (Eds.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom ; New York, NY, USA.
- CMCC, 2016. COSMO-CLM – Climate Limited-area Modelling Community [WWW Document]. URL <http://www.cmcc.it/it/models/cosmo-clm-climate-limited-area-modelling-community#!> (accessed 5.10.16).
- Coley, D., Kershaw, T., Eames, M., 2012. A comparison of structural and behavioural adaptations to future proofing buildings against higher temperatures. *Build. Environ., Implications of a Changing Climate for Buildings* 55, 159–166. doi:10.1016/j.buildenv.2011.12.011
- Collegio Ingegneri della Toscana, 2015. Bollettino ingegneri 2015. Collegio Ingegneri della Toscana.
- Commissione Europea, 2012. Orientamenti che accompagnano il regolamento delegato (UE) n. 244/2012 del 16 gennaio 2012 della Commissione che integra la direttiva 2010/31/UE del Parlamento europeo e del Consiglio sulla prestazione energetica nell'edilizia istituendo un quadro metodologico comparativo per

calcolare livelli ottimali in funzione dei costi per i requisiti minimi di prestazione energetica degli edifici e degli elementi edilizi.

- Commissione Europea, 2010. Communication from the commission Europe 2020. A strategy for smart, sustainable and inclusive growth.
- Consiglio nazionale delle ricerche, 1998. Manuale dell'architetto, 3. ed. ed, Anastatica Sapere 1. Sapere 2000, Roma.
- Corrado, V., Ballarini, I., 2015. L'avanzamento della riqualificazione energetica del patrimonio edilizio residenziale regionale (Regione Piemonte, IT).
- Corrado, V., Ballarini, I., Corgnati, S.P., 2014. Building Typology Brochure – Italy.
- Corrado, V., Paduos, S., 2010. Strumenti di calcolo e dati di riferimento per la certificazione energetica degli edifici. Report RdS/2010/187.
- Costa, M., 1985. Edilizia residenziale pubblica in Italia: le realizzazioni degli Istituti autonomi case popolari e le normative tecniche di attuazione / Mario Costa, Progettazione in architettura. BE-MA editrice, Milano.
- Costanzo, V., Evola, G., Gagliano, A., Marletta, L., Nocera, F., 2013. Study on the application of cool paintings for the passive cooling of existing buildings in mediterranean climates. Adv. Mech. Eng. 2013. doi:10.1155/2013/413675
- Costanzo, V., Evola, G., Marletta, L., 2016. Energy savings in buildings or UHI mitigation? Comparison between green roofs and cool roofs. Energy Build., SI: Countermeasures to Urban Heat Island 114, 247–255. doi:10.1016/j.enbuild.2015.04.053
- Crawley, D.B., Lawrie, L.K., Pedersen, C.O., Winkelmann, F.C., Witte, M.J., Strand, R.K., Liesen, R.J., Buhl, W.F., Huang, Y.J., Henninger, R.H., Glazer, J., Fisher, D.E., Shirey, D.B., Griffith, B.T., Ellis, P.G., Gu, L., 2004. ENERGYPLUS: NEW, CAPABLE, AND LINKED. J. Archit. Plan. Res. 21, 292–302.
- Crawley, D.B., Pedersen, C.O., Lawrie, L.K., Winkelmann, F.C., 2000. EnergyPlus: Energy Simulation Program. ASHRAE J. 42, 49–56.
- CTI - Comitato Termotecnico Italiano, 2016a. IEE Project RePublic_ZEB [WWW Document]. URL <http://www.republiczeb.org/index.jsp>
- CTI - Comitato Termotecnico Italiano, 2016b. Anni Tipo Climatici [WWW Document]. URL <http://try.cti2000.it/>
- CTI - Comitato Termotecnico Italiano, 2012. STUDIO DI CASO. EDIFICIO 1D. Dati di input e risultati di calcolo. Versione: 04 (del 10 maggio 2012).
- CTI - Comitato Termotecnico Italiano, 2010a. STUDIO DI CASO. EDIFICIO 4A. Dati di input e risultati di calcolo. Versione: gennaio 2010-2.
- CTI - Comitato Termotecnico Italiano, 2010b. STUDIO DI CASO. EDIFICIO 5A. Dati di input e risultati di calcolo. Versione: marzo 2010-1.

- Cubasch, U., Wuebbles, D., Chen, D., Facchini, M.C., Frame, D., Mahowald, N., Winther, J.-G., 2013. Introduction, in: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. (Eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- de Wilde, P., Coley, D., 2012. The implications of a changing climate for buildings. *Build. Environ., Implications of a Changing Climate for Buildings* 55, 1–7. doi:10.1016/j.buildenv.2012.03.014
- de Wilde, P., Tian, W., 2012. Management of thermal performance risks in buildings subject to climate change. *Implic. Chang. Clim. Build.* 55, 167–177. doi:10.1016/j.buildenv.2012.01.018
- de Wilde, P., Tian, W., 2011. Towards probabilistic performance metrics for climate change impact studies. *Energy Build.* 43, 3013–3018. doi:10.1016/j.enbuild.2011.07.014
- Decreto del Presidente della Repubblica 2 aprile 2009 n.59. Regolamento di attuazione dell'articolo 4, comma 1, lettere a) e b), del decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, concernente attuazione della direttiva 2002/91/CE sul rendimento energetico in edilizia., 2009.
- Decreto legislativo 4 luglio 2014 n. 102. Attuazione della direttiva 2012/27/UE sull'efficienza energetica, che modifica le direttive 2009/125/CE e 2010/30/UE e abroga le direttive 2004/8/CE e 2006/32/CE. (14G00113) (GU Serie Generale n.165 del 18-7- 2014), 2014.
- Decreto Ministeriale 26 giugno 2015. Applicazione delle metodologie di calcolo delle prestazioni energetiche e definizione delle prescrizioni e dei requisiti minimi degli edifici, 2015.
- Design Builder Software Ltd, 2016. Design Builder Website [WWW Document]. URL <http://www.designbuilder.co.uk/> (accessed 10.30.15).
- DesignBuilder Software Ltd, 2015. EN 15265/ ISO 13790 Standard (2008) - Tests for the calculation of energy use for space heating and cooling. DesignBuilder Version 4.5 (incorporating EnergyPlus version 8.3.0) – May 2015.
- DesignBuilder Software Ltd, 2014a. ANSI/ASHRAE Standard 140-2011 Building Thermal Envelope and Fabric Load Tests. DesignBuilder Version 3.4 (incorporating EnergyPlus version 8.1.0) - Jan 2014.
- DesignBuilder Software Ltd, 2014b. ANSI/ASHRAE Standard 140-2011 Building Thermal Envelope and Fabric Load Tests. DesignBuilder Version 4.2 (incorporating EnergyPlus version 8.1.0) - Oct 2014.
- DesignBuilder Software Ltd, 2011. EN ISO 13790 Standard (2008) Tests for the calculation of energy use for space heating and cooling. DesignBuilder Version 3.1 (incorporating EnergyPlus version 7.1.0) – 11 July 2012.

- Di Giulio, R., Croce, S., 2003. Manuale di manutenzione edilizia: valutazione del degrado e programmazione della manutenzione / Roberto Di Giulio ; presentazione di Sergio Croce, 2. ed. ed, Manutenzione edilizia e urbana. Maggioli, Rimini.
- Diffenbaugh, N.S., Pal, J.S., Giorgi, F., Gao, X., 2007. Heat stress intensification in the Mediterranean climate change hotspot. *Geophys. Res. Lett.* 34. doi:10.1029/2007GL030000
- Direttiva 2010/31/UE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 19 maggio 2010, sulla prestazione energetica nell'edilizia, 2010.
- D'Oca, S., Fabi, V., Corgnati, S.P., Andersen, R.K., 2014. Effect of thermostat and window opening occupant behavior models on energy use in homes. *Build. Simul.* 7, 683–694. doi:10.1007/s12273-014-0191-6
- Douglas, I., 1992. The case for urban ecology. *Urban Nat. Mag.* 1, 15–17.
- E3M-Lab, 2016. EU Reference Scenario 2016 Energy, transport and GHG emissions. Trends to 2050.
- ENEA - Unità Centrale Studi e Strategie, 2012. Rapporto Energia e Ambiente 2009-2010. I dati. ENEA, Roma.
- EnergieSprong Platform 31, 2014. TRANSITION ZERO.
- Energy Plus, 2016. Energy Plus simulation software website [WWW Document].
- Energy Plus, 2013. Getting Started with EnergyPlus. Basic Concepts Manual - Essential Information You Need about Running EnergyPlus.
- Energy Plus Weather Data [WWW Document], 2016. URL <https://energyplus.net/weather> (accessed 9.9.16).
- Ente Nazionale Italiano di Unificazione - UNI, 2016. UNI/TS 11300-5. Prestazioni energetiche degli edifici - Parte 5: Calcolo dell'energia primaria e della quota di energia da fonti rinnovabili. UNI, Milano.
- Ente Nazionale Italiano di Unificazione - UNI, 2014a. UNI/TS 11300. Prestazioni energetiche degli edifici. Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica per la climatizzazione invernale ed estiva. UNI, Milano.
- Ente Nazionale Italiano di Unificazione - UNI, 2014b. UNI/TS 11300. Prestazioni energetiche degli edifici. Parte 2: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale per la produzione di acqua calda sanitaria, per la ventilazione e per l'illuminazione in edifici non residenziali. UNI, Milano.
- Ente Nazionale Italiano di Unificazione - UNI, 2014c. UNI/TR 11552. Abaco delle strutture costituenti l'involucro opaco degli edifici. Parametri termofisici. UNI, Milano.

- Ente Nazionale Italiano di Unificazione - UNI, 2010. UNI/TS 11300. Prestazioni energetiche degli edifici. Parte 3: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione estiva. UNI, Milano.
- Ente Nazionale Italiano di Unificazione - UNI, 2008a. UNI/TS 11300. Prestazioni energetiche degli edifici. Parte 2: Determinazione del fabbisogno di energia primaria e dei rendimenti per la climatizzazione invernale per la produzione di acqua calda sanitaria. UNI.
- Ente Nazionale Italiano di Unificazione - UNI, 2008b. UNI/TS 11300. Prestazioni energetiche degli edifici. Parte 1: Determinazione del fabbisogno di energia termica per la climatizzazione invernale ed estiva. UNI, Milano.
- Ente Nazionale Italiano di Unificazione - UNI, 2008c. UNI EN 15459. Prestazione energetica degli edifici. Procedura di valutazione economica dei sistemi energetici degli edifici. UNI, Milano.
- Ente Nazionale Italiano di Unificazione - UNI, 2008d. UNI EN 15242. Ventilazione degli edifici. Metodi di calcolo per la determinazione delle portate d'aria negli edifici, comprese le infiltrazioni. UNI, Milano.
- Episcope Project Team, 2016. Monitor Progress Towards Climate Targets in European Housing Stocks. Main Results of the EPISCOPE Project - Final Project Report.
- Erba, V., 2015. Edifici ad energia quasi zero Nuove norme e soluzioni per gli edifici di domani. Neo Eubios 51.
- European Climate Adaptation Platform, 2016. Urban vulnerability Map book - Climatic threats - Heat waves - Exposure [WWW Document]. URL <http://climate-adapt.eea.europa.eu/tools/urban-adaptation/climatic-threats/heat-waves/exposure>
- Eurostat, 2016. Eurostat: heating degree-days by NUTS 2 regions. [WWW Document]. URL <http://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data> (accessed 6.30.16).
- Evola, G., Margani, G., Marletta, L., 2014a. Cost-effective design solutions for low-rise residential Net ZEBs in Mediterranean climate. *Energy Build.* 68, Part A, 7–18. doi:10.1016/j.enbuild.2013.09.026
- Evola, G., Marletta, L., Costanzo, V., Caruso, G., 2015. Different Strategies for Improving Summer Thermal Comfort in Heavyweight Traditional Buildings. *Energy Procedia*, 6th International Building Physics Conference, IBPC 2015 78, 3228–3233. doi:10.1016/j.egypro.2015.11.785
- Evola, G., Marletta, L., Sicurella, F., 2014b. Simulation of a ventilated cavity to enhance the effectiveness of PCM wallboards for summer thermal comfort in buildings. *Energy Build.* 70, 480–489. doi:10.1016/j.enbuild.2013.11.089
- Fabi, V., 2013. Influence of occupant's behaviour on indoor environmental quality and energy consumptions (Ph. D Thesis). Politecnico di Torino.

- Fantozzi, G., Roda, R., 1992. Edilizia residenziale a Prato, 1966-91 : 25 anni di attività del Consorzio Comprensoriale Pratese fra le cooperative di abitazione aderenti all'ARCAT-Lega, Architetture urbane. Alinea, Firenze.
- Ferrari, S., 2007. Building envelope and heat capacity: re-discovering the thermal mass for winter energy saving, in: 2nd PALENC Conference and 28th AIVC Conference on Building Low Energy Cooling and Advance Ventilation Technologies in the 21st Century, Greece. pp. 346–351.
- Ferrari, S., Zagarella, F., 2015. Costs Assessment for Building Renovation Cost-optimal Analysis. Energy Procedia, 6th International Building Physics Conference, IBPC 2015 78, 2378–2384. doi:10.1016/j.egypro.2015.11.193
- Ferreira, M., Almeida, M., 2015. Benefits from Energy Related Building Renovation Beyond Costs, Energy and Emissions. Energy Procedia, 6th International Building Physics Conference, IBPC 2015 78, 2397–2402. doi:10.1016/j.egypro.2015.11.199
- Filippín, C., Ricard, F., Flores Larsen, S., 2013. Evaluation of heating energy consumption patterns in the residential building sector using stepwise selection and multivariate analysis. Energy Build. 66, 571–581. doi:10.1016/j.enbuild.2013.07.054
- Florides, G.A., Tassou, S.A., Kalogirou, S.A., Wrobel, L.C., 2002. Measures used to lower building energy consumption and their cost effectiveness. Appl. Energy 73, 299–328. doi:10.1016/S0306-2619(02)00119-8
- GESCAL - Gestione case per lavoratori, 1965. Norme tecniche di esecuzione delle costruzioni, con speciale riferimento alla progettazione (art. 23c della legge 14-2-1963, n. 60 e art. 31e del regolamento di attuazione DPR 11-10-1963, n. 1471).
- Giorgi, F., 2006. Climate change hot-spots. Geophys. Res. Lett. 33. doi:10.1029/2006GL025734
- Giorgi, F., Lionello, P., 2008. Climate change projections for the Mediterranean region. Glob. Planet. Change 63, 90–104. doi:10.1016/j.gloplacha.2007.09.005
- Gualdi, S., Somot, S., Li, L., Artale, V., Adani, M., Bellucci, A., Braun, A., Calmanti, S., Carillo, A., Dell'Aquila, A., Déqué, M., Dubois, C., Elizalde, A., Harzallah, A., Jacob, D., L'Hévéder, B., May, W., Oddo, P., Ruti, P., Sanna, A., Sannino, G., Scoccimarro, E., Sevault, F., Navarra, A., 2013. The CIRCE Simulations: Regional Climate Change Projections with Realistic Representation of the Mediterranean Sea. Bull. Am. Meteorol. Soc. 94, 65–81. doi:10.1175/BAMS-D-11-00136.1
- Guan, L., 2009. Preparation of future weather data to study the impact of climate change on buildings. Build. Environ. 44, 793–800. doi:10.1016/j.buildenv.2008.05.021

- Gupta, R., Gregg, M., 2012. Using UK climate change projections to adapt existing English homes for a warming climate. *Build. Environ., Implications of a Changing Climate for Buildings* 55, 20–42. doi:10.1016/j.buildenv.2012.01.014
- Hong, T., Taylor-Lange, S.C., D’Oca, S., Yan, D., Corgnati, S.P., 2016. Advances in research and applications of energy-related occupant behavior in buildings. *Energy Build.* 116, 694–702. doi:10.1016/j.enbuild.2015.11.052
- IEA - ECBCS, 2004. Annex 31 Energy Related Environmental Impact of Buildings - Stock Aggregation: Methods for Evaluating the Environmental Performance of Building Stocks.
- IEA EBC Annex 56, 2014. Shining Examples of Cost-Effective Energy and Carbon Emissions Optimization in Building Renovation (Annex 56).
- INA-CASA, 1950. Piano incremento occupazione operaia : case per lavoratori. Vol.2: Suggestimenti esempi e norme per la progettazione urbanistica. Progetti tipo. Danesi, Roma.
- INA-CASA, 1949. Piano incremento occupazione operaia : case per lavoratori. Vol. 1: Suggestimenti, norme e schemi per la elaborazione e presentazione dei progetti. Bandi dei concorsi. Damasso, Roma.
- INA-CASA, n.d. Piano incremento occupazione operaia : case per lavoratori. Vol. 3: Guida per l’esame dei progetti delle costruzioni INA Casa da realizzare nel secondo settennio. TI. BA., Roma.
- Institut Wohnen und Umwelt GmbH, 2016a. IEE Project TABULA (2009 - 2012) [WWW Document]. URL <http://episcopes.eu/iee-project/tabula/> (accessed 4.12.16).
- Institut Wohnen und Umwelt GmbH, 2016b. IEE Project “EPISCOPE” [WWW Document]. URL <http://episcopes.eu/iee-project/episcopes/> (accessed 4.12.16).
- Institut Wohnen und Umwelt GmbH, 2016c. TABULA WebTool [WWW Document]. TABULA WebTool. URL <http://webtool.building-typology.eu> (accessed 7.15.16).
- Intergovernmental Panel on Climate Change (Ed.), 2014a. Atlas of Global and Regional Climate Projections, in: *Climate Change 2013 - The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 1311–1394.
- Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014b. Scenario process for AR5 [WWW Document]. URL http://sedac.ipcc-data.org/ddc/ar5_scenario_process/ (accessed 4.16.16).
- ISPRA - Istituto superiore per la protezione e la ricerca ambientale, 2015. SCIA - Sistema nazionale per la raccolta, l’elaborazione e la diffusione di dati Climatici di Interesse Ambientale [WWW Document]. URL http://www.scia.isprambiente.it/home_new.asp (accessed 10.30.15).

- ItMeteoData, 2016. Banca dati dei TRY in Italia [WWW Document]. URL <http://www.itmeteodata.com/>
- Jaber, S., Ajib, S., 2011. Optimum, technical and energy efficiency design of residential building in Mediterranean region. *Energy Build.* 43, 1829–1834. doi:10.1016/j.enbuild.2011.03.024
- Jentsch, M.F., 2012. Climate changeweather file generators e technical reference manual for the CCWeatherGen and CCWorldWeatherGen tools.
- Jentsch, M.F., Bahaj, A.S., James, P.A.B., 2008. Climate change future proofing of buildings—Generation and assessment of building simulation weather files. *Energy Build.* 40, 2148–2168. doi:10.1016/j.enbuild.2008.06.005
- Jentsch, M.F., James, P.A.B., Bourikas, L., Bahaj, A.S., 2013. Transforming existing weather data for worldwide locations to enable energy and building performance simulation under future climates. *Renew. Energy* 55, 514–524. doi:10.1016/j.renene.2012.12.049
- Kalvelage, K., Passe, U., Rabideau, S., Takle, E.S., 2014. Changing climate: The effects on energy demand and human comfort. *Energy Build.* 76, 373–380. doi:10.1016/j.enbuild.2014.03.009
- Kim, G., Lim, H.S., Lim, T.S., Schaefer, L., Kim, J.T., 2012. Comparative advantage of an exterior shading device in thermal performance for residential buildings. *Energy Build., Sustainable and healthy buildings* 46, 105–111. doi:10.1016/j.enbuild.2011.10.040
- Kovats, R.S., Valentini, R., Bouwer, L.M., Georgopoulou, E., Jacob, D., Martin, E., Rounsevell, M., Soussana, J.-F., 2014. Europe, in: Barros, V.R., Field, C.B., Dokken, D.J., Mastrandrea, M.D., Mach, K.J., Bilir, T.E., Chatterjee, M., Ebi, K.L., Estrada, Y.O., Genova, R.C., Girma, B., Kissel, E.S., Levy, A.N., MacCracken, S., Mastrandrea, P.R., White, L.L. (Eds.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1267–1326.
- Kuglitsch, F.G., Toreti, A., Xoplaki, E., Della-Marta, P.M., Zerefos, C.S., Türkeş, M., Luterbacher, J., 2010. Heat wave changes in the eastern Mediterranean since 1960: HEAT WAVES IN THE EASTERN MEDITERRANEAN. *Geophys. Res. Lett.* 37, n/a-n/a. doi:10.1029/2009GL041841
- Lawrence Berkeley National Laboratory, 2013. Auxiliary EnergyPlus Programs.
- Lee, B., Hensen, J.L.M., 2015. Developing a Risk Indicator to Quantify Robust Building Design. *Energy Procedia*, 6th International Building Physics Conference, IBPC 2015 78, 1895–1900. doi:10.1016/j.egypro.2015.11.357
- Leoni, G., Maffei, S., 1998. *La casa popolare: storia istituzionale e storia quotidiana dell'Istituto autonomo case popolari della provincia di Modena, 1907-1997 / a cura di Giovanni Leoni e Stefano Maffei*. Electa, Milano.

- Lionello, P., Abrantes, F., Congedi, L., Dulac, F., Gacic, M., Gomis, D., Goodess, C., Hoff, H., Kutiel, H., Luterbacher, J., Planton, S., Reale, M., Schröder, K., Vittoria Struglia, M., Toreti, A., Tsimplis, M., Ulbrich, U., Xoplaki, E., 2012. Introduction: Mediterranean Climate—Background Information, in: *The Climate of the Mediterranean Region*. Elsevier, Oxford, pp. xxxv–xc.
- Loga, T., Diefenbach, N., Stein, B., 2012. Tabula executive summary.
- Malighetti, L., 2009. *Le tipologie edilizie residenziali*.
- Mandurino, C., 2009. *I dati meteorologici per applicazioni energetiche e ambientali (Dottorato di ricerca in Ingegneria energetica, nucleare e del controllo ambientale, 21 Ciclo)*. Alma Mater Studiorum Università di Bologna, Bologna.
- Mark, L., 2012. *The Architect's Journal. Specification: external blinds [WWW Document]*.
- Marta, R., Panzarasa, S. (Eds.), 1963. *Itinerari INA-casa*. Tipografia SoGraRo, Roma.
- Matthies, F., Bickler, G., Marin, N.C., Hales, S. (Eds.), 2008. *Heat-Health Action Plans: Guidance*. World Health Organization.
- McKenna, E., Krawczynski, M., Thomson, M., 2015. Four-state domestic building occupancy model for energy demand simulations. *Energy Build.* 96, 30–39. doi:10.1016/j.enbuild.2015.03.013
- McLeod, R.S., Hopfe, C.J., Kwan, A., 2013a. An investigation into future performance and overheating risks in Passivhaus dwellings. *Build. Environ.* 70, 189–209. doi:10.1016/j.buildenv.2013.08.024
- McLeod, R.S., Hopfe, C.J., Kwan, A., 2013b. An investigation into future performance and overheating risks in Passivhaus dwellings. *Build. Environ.* 70, 189–209. doi:10.1016/j.buildenv.2013.08.024
- Ministero dello Sviluppo Economico, 2015a. PANZEB. Piano d'Azione Nazionale per incrementare gli edifici ad energia quasi zero.
- Ministero dello Sviluppo Economico, 2015b. STREPIN. Strategia per la Riqualificazione Energetica del Parco Immobiliare Nazionale.
- Ministero dello Sviluppo Economico, 2013. *Applicazione della metodologia di calcolo dei livelli ottimali in funzione dei costi per i requisiti minimi di prestazione energetica (Direttiva 2010/31/ue art. 5)*.
- Morck, O., Almeida, M., Ferreira, M., Brito, N., Thomsen, K.E., Østergaard, I., 2016. Shining examples analysed within the EBC Annex 56 project. *Energy Build.* 127, 991–998. doi:10.1016/j.enbuild.2016.05.091
- Morck, O., Almeida, M., Ferreira, M., Brito, N., Thomsen, K.E., Østergaard, I., 2015. Shining Examples Analysed within the EBC Annex 56 Project. *Energy Procedia*, 6th International Building Physics Conference, IBPC 2015 78, 2334–2339. doi:10.1016/j.egypro.2015.11.393

- Nik, V.M., Sasic Kalagasidis, A., 2013. Impact study of the climate change on the energy performance of the building stock in Stockholm considering four climate uncertainties. *Build. Environ.* 60, 291–304. doi:10.1016/j.buildenv.2012.11.005
- Nikoofard, S., Ismet Ugursal, V., Beausoleil-Morrison, I., 2014. Technoeconomic assessment of the impact of window shading retrofits on the heating and cooling energy consumption and GHG emissions of the Canadian housing stock. *Energy Build.* 69, 354–366. doi:10.1016/j.enbuild.2013.11.023
- Nocera, M., 2015. Le detrazioni fiscali del 55-65% per la riqualificazione energetica del patrimonio edilizio esistente nel 2013. Enea, Roma.
- Nuti, F., 2004. Tre quartieri INA-casa in Toscana. Polistampa, Firenze.
- ODYSSEE-MURE Project, 2015. Odyssee: Energy Efficiency Database [WWW Document]. URL <http://www.indicators.odyssee-mure.eu/energy-efficiency-database.html> (accessed 9.3.15).
- Palmero-Marrero, A.I., Oliveira, A.C., 2010. Effect of louver shading devices on building energy requirements. *Appl. Energy* 87, 2040–2049. doi:10.1016/j.apenergy.2009.11.020
- Pierangioli, L., Cellai, G., Ferrise, R., Trombi, G., Bindi, M., 2017. Effectiveness of passive measures against climate change: Case studies in Central Italy. *Build. Simul.* 1–21. doi:10.1007/s12273-016-0346-8
- Pinna, M., 1978. L'atmosfera e il clima. UTET, Torino.
- Pisello, A.L., Asdrubali, F., 2014. Human-based energy retrofits in residential buildings: A cost-effective alternative to traditional physical strategies. *Appl. Energy* 133, 224–235. doi:10.1016/j.apenergy.2014.07.049
- Porritt, S.M., Cropper, P.C., Shao, L., Goodier, C.I., 2012. Ranking of interventions to reduce dwelling overheating during heat waves. *Energy Build., Cool Roofs, Cool Pavements, Cool Cities, and Cool World* 55, 16–27. doi:10.1016/j.enbuild.2012.01.043
- Regione Emilia Romagna, 2015. Indicazioni metodologiche per l'applicazione dei fattori di conversione al metodo di calcolo di cui alla DGR 967/2015 e alla DGR 1275/2015.
- Regolamento Delegato (UE) n. 244/2012 della Commissione del 16 gennaio 2012 che integra la direttiva 2010/31/UE del Parlamento europeo e del Consiglio sulla prestazione energetica nell'edilizia istituendo un quadro metodologico comparativo per il calcolo dei livelli ottimali in funzione dei costi per i requisiti minimi di prestazione energetica degli edifici e degli elementi edilizi, 2012.
- Revi, A., Satterthwaite, D.E., Aragón-Durand, F., Corfee-Morlot, J., Kiunsi, R.B.R., Pelling, M., Roberts, D.C., Solecki, W., 2014. Urban areas, in: Field, C.B., Barros, V.R., Dokken, D.J., Mach, K.J., Mastrandrea, M.D., Bilir, T.E., Chatterjee, M., Ebi, K.L., Estrada, Y.O., Genova, R.C., Girma, B., Kissel, E.S., Levy, A.N., MacCracken, S., Mastrandrea, P.R., White, L.L. (Eds.), *Climate*

Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 535–612.

- Riva, G., Murano, G., Corrado, V., Baggio, P., Antonacci, G., 2012. Aggiornamento parametri climatici nazionali e zonizzazione del clima nazionale ai fini della certificazione estiva. Report RdS/2012/106.
- Robert, A., Kummert, M., 2012. Designing net-zero energy buildings for the future climate, not for the past. *Build. Environ., Implications of a Changing Climate for Buildings* 55, 150–158. doi:10.1016/j.buildenv.2011.12.014
- Rocco, L., Cellai, G., Baistrocchi, C., Sauro, S., Secchi, S., 2016. L'evoluzione della protezione acustica degli edifici in Italia: norme, metodi e soluzioni, in: 43° Convegno Nazionale AIA. Alghero.
- Roda, R., Ronzoni, M.R., Monti, C. (Eds.), 2009. Una nuova stagione per l'housing sociale. BE-MA, Milano.
- Sciurpi, F., Carletti, C., Cellai, G., Pierangioli, L., 2015. Environmental monitoring and microclimatic control strategies in “La Specola” museum of Florence. *Energy Build., Special Issue: Historic, historical and existing buildings: designing the retrofit. An overview from energy performances to indoor air quality* 95, 190–201. doi:10.1016/j.enbuild.2014.10.061
- Secchi, B., Toti, A., 2000. IACP/ATER 1909-1999 : novant'anni di case popolari a Firenze, Saggi e documenti di storia dell'architettura.
- Secchi, S., Sciurpi, F., Randazzo, M., Pierangioli, L., 2016. Retrofit Strategies for the Improvement of Visual Comfort and Energy Performance of Classrooms with Large Windows Exposed to East. *Energy Procedia* 78, 3144–3149. doi:10.1016/j.egypro.2015.11.771
- Servizio Agrometeorologico Regione Toscana, 2015. Consultazione archivi storici (1990-2010) [WWW Document]. URL <http://agrometeo.arsia.toscana.it> (accessed 10.30.15).
- Soltec Sun Shading Systems, 2016. Soltec Blinds Z90. Technical catalogue.
- Stevanović, S., 2013. Optimization of passive solar design strategies: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 25, 177–196. doi:10.1016/j.rser.2013.04.028
- TABULA Project Team, 2013. TABULA Calculation Method – Energy Use for Heating and Domestic Hot Water – Reference Calculation and Adaptation to the Typical Level of Measured Consumption. Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, Germany.
- Timmerman, J., 2015. Map book urban vulnerability to climate change – Factsheets. European Environment Agency, Copenhagen.

- Toso, F., Mura, A., 2014. Analisi della dotazione impiantistica di climatizzazione (estiva ed invernale) del patrimonio edilizio ad uso residenziale e terziario e valutazione dell'impatto economico in relazione a misure di politiche energetiche e ambientali finalizzate a incidere sensibilmente sull'efficienza negli usi finali e alla promozione di fonti di energia rinnovabile - Report RdS/PAR2014/ 06. ENEA, Roma.
- Tsikaloudaki, K., Theodosiou, T., Laskos, K., Bikas, D., 2012. Assessing cooling energy performance of windows for residential buildings in the Mediterranean zone. *Energy Convers. Manag.*, IREC 2011, The International Renewable Energy Congress 64, 335–343. doi:10.1016/j.enconman.2012.04.020
- UNFPA, 1999. State of World Population 1999.
- UNI - Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 2008a. UNI EN 15459. Prestazione energetica degli edifici. Procedura di valutazione economica dei sistemi energetici degli edifici. UNI, Milano.
- UNI - Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 2008b. UNI EN ISO 13790. Prestazione energetica degli edifici. Calcolo del fabbisogno di energia per il riscaldamento e il raffrescamento. UNI, Milano.
- UNI - Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 2004. UNI EN ISO 15927. Prestazione termoigrometrica degli edifici. Calcolo e presentazione dei dati climatici. Parte 1: Medie mensili dei singoli elementi meteorologici. UNI, Milano.
- UNI - Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 1994. UNI 10349. Riscaldamento e raffrescamento degli edifici. Dati climatici. UNI, Milano.
- UNI Ente di Unificazione Italiano, 2005. UNI EN ISO 15927. Calcolo e presentazione dei dati climatici. Parte 4: Dati orari per la valutazione del fabbisogno annuale di energia per il riscaldamento e il raffrescamento, UNI. ed. Milano.
- UNI Ente Nazionale Italiano di Unificazione, 2008. UNI EN ISO 15927. Prestazione termoigrometrica degli edifici. Calcolo e presentazione dei dati climatici. Parte 6: Differenze di temperatura cumulate (gradi giorno). UNI, Milano.
- Unità Centrale Studi e Strategie ENEA, 2014. Rapporto Energia e Ambiente. Scenari e Strategie 2013. ENEA, Roma.
- Ursini Casalena, A., 2015. Quali Software per la Simulazione Energetica Dinamica degli Edifici? [WWW Document]. MyGreenBuildings. URL <http://www.mygreenbuildings.org/2015/05/20/software-simulazione-dinamica-edifici.html>
- van Hooff, T., Blocken, B., Hensen, J.L.M., Timmermans, H.J.P., 2015. Reprint of: On the predicted effectiveness of climate adaptation measures for residential buildings. *Build. Environ.*, Special Issue: Climate adaptation in cities 83, 142–158. doi:10.1016/j.buildenv.2014.10.006

- van Hooff, T., Blocken, B., Hensen, J.L.M., Timmermans, H.J.P., 2014. On the predicted effectiveness of climate adaptation measures for residential buildings. *Build. Environ.* 82, 300–316. doi:10.1016/j.buildenv.2014.08.027
- van Hooff, T., Blocken, B., Timmermans, H.J.P., Hensen, J.L.M., 2016. Analysis of the predicted effect of passive climate adaptation measures on energy demand for cooling and heating in a residential building. *Energy* 94, 811–820. doi:10.1016/j.energy.2015.11.036
- Waddicor, D.A., Fuentes, E., Sisó, L., Salom, J., Favre, B., Jiménez, C., Azar, M., 2016. Climate change and building ageing impact on building energy performance and mitigation measures application: A case study in Turin, northern Italy. *Build. Environ.* 102, 13–25. doi:10.1016/j.buildenv.2016.03.003
- Wang, H., Chen, Q., 2014. Impact of climate change heating and cooling energy use in buildings in the United States. *Energy Build.* 82, 428–436. doi:10.1016/j.enbuild.2014.07.034
- WAREMA, 2016. Positive CO2 balance for external venetian blinds [WWW Document]. URL http://www.warema.com/en/BUSINESS_PARTNERS/PRODUCTS/External_venetian_blinds/_W_and_A/Carbon_Footprint.php (accessed 10.31.16).
- WHO, 2003. Briefing note for the fifty-third session of the WHO Regional Committee for Europe. Vienna, Austria, 8–11 September 2003.
- Zhai, Z. (John), Johnson, M.-H., Krarti, M., 2011. Assessment of natural and hybrid ventilation models in whole-building energy simulations. *Energy Build.* 43, 2251–2261. doi:10.1016/j.enbuild.2011.06.026
- Zhao, M., Künzle, H.M., Antretter, F., 2015. Parameters influencing the energy performance of residential buildings in different Chinese climate zones. *Energy Build.* 96, 64–75. doi:10.1016/j.enbuild.2015.03.007
- Zhu, D., Hong, T., Yan, D., Wang, C., 2013. A detailed loads comparison of three building energy modeling programs: EnergyPlus, DeST and DOE-2.1E. *Build. Simul.* 6, 323–335. doi:10.1007/s12273-013-0126-7